



**Catarina Mourão
Carvalho**

**Simulação do comportamento térmico de edifícios
com fachadas ventiladas**



**Catarina Mourão
Carvalho**

**Simulação do comportamento térmico de edifícios
com fachadas ventiladas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor Rui António da Silva Moreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, Nuno Carvalho e Isabel Mourão e ao meu irmão Filipe Carvalho.

o júri

presidente

Prof. Dr. Fernando José Neto da Silva
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Romeu da Silva Vicente
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Nelson Amadeu Dias Martins
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Rui António da Silva Moreira
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Apesar deste trabalho ser de carácter individual, este trabalho só foi possível graças aos diversos apoios e incentivos que me foram proporcionados por professores, família e amigos pelo que não posso deixar de lhes expressar os meus mais sinceros agradecimentos.

Assim começaria por agradecer aos Professores Nelson Martins e Rui Moreira, respectivamente orientador e co-orientador por toda a orientação, constante optimismo, dedicação e disponibilidade constante me permitiram a realização deste trabalho.

Aos meus amigos por todo o apoio que me prestaram neste ano difícil, e com um sorriso que lhes agradeço todos os bons momentos que passamos juntos.

Por último aos meus pais irmão e família por todo o apoio que me deram, por sempre acreditarem em mim, a vocês devo uma parte daquilo que sou hoje. Obrigado!

palavras-chave

Fachadas Ventiladas, Fachadas Duplas, Simulação térmica.

resumo

Com a entrada em vigor dos novos regulamentos na área de consumo energético de edifícios, torna-se cada vez mais importante a simulação do comportamento térmico destes. Existe ainda a necessidade de criar novas soluções construtivas, sendo uma delas o uso de fachadas ventiladas. As fachadas ventiladas podem ser definidas como um sistema de revestimento exterior de edifícios, cuja principal característica é a existência de uma caixa-de-ar em movimento, resultante do afastamento entre a parede do edifício e o revestimento. O principal objectivo do presente estudo é analisar o sistema construtivo em três regiões climáticas de Portugal: Bragança, Ovar e Évora. Para tal recorreu-se a dois programas de simulação, o EnergyPlus e o DesignBuilder. Com base nos resultados obtidos pelo EnergyPlus calcularam-se os consumos em Aquecimento e Arrefecimento e os respectivos Graus Dias. Observando os resultados, conclui-se que de uma forma geral a utilização de fachadas ventiladas reduz os consumos em Aquecimento e Arrefecimento nas três regiões climáticas. No entanto, é na estação de Arrefecimento que se verifica uma redução mais acentuada. Observou-se ainda que a colocação de um damper nas aberturas melhorava significativamente a prestação do edifício na estação de Arrefecimento.

keywords

Ventilated facades, Double facaded, thermal simulation

abstract

With the new regulations in the area of energy consumption of buildings, it is very important to simulate the thermal behavior of these. There is still the necessity of create a new constructive solution, being one of them the use of ventilated facades. The ventilated facades can be defined as an outer cover system of buildings, whose main characteristic is the existence of an air cavity in movement, resultant of the breakaway between the wall of the building and the covering. The main subject of the present study its to analyze the constructive system in three climatic zones of Portugal: Bragança, Ovar and Évora. For that, we used two programs to do the simulation, the EnergyPlus and the DesignBuilder. Attempting to the results obtained from EnergyPlus, we calculated the consumptions in Heating and Cooling, and the respective Degrees Days. Observing the results, we conclude that the use of ventilated facades generally reduces the consumptions in Heating and Cooling in the three climatic regions. However, it is in the Cooling Season that the reduction is more accented. When we use a damper in the openings, this can significantly improve the installment of the building in the Cooling Season.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | XVII |
| ÍNDICE DE TABELAS | XX |
| LISTA DE ACRÓNIMOS | XXI |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XXII |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.2 OBJECTIVOS | 2 |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO..... | 3 |
| 1.4 TERMINOLOGIA UTILIZADA | 4 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 2.1 ENQUADRAMENTO | 5 |
| 2.2 EVOLUÇÃO DAS FACHADAS EM PORTUGAL | 6 |
| 2.3 TIPOS DE ISOLAMENTO DA FACHADA | 8 |
| 2.3.1 Isolamento da fachada pelo exterior..... | 9 |
| 2.4 ESTADO DA ARTE | 11 |
| 2.5 FACHADAS VENTILADAS..... | 14 |
| 2.6 CONCLUSÃO..... | 25 |
| 3 MODELOS E MÉTODOS..... | 27 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 27 |
| 3.1.1 Software utilizado..... | 28 |
| 3.2 MODELO MATEMÁTICO | 29 |
| 3.2.1 Balanço Energético Utilizado pelo programa EnergyPlus..... | 30 |
| 4 METODOLOGIA | 37 |
| 4.1 PROCEDIMENTO E METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO | 37 |
| 4.2 EDIFÍCIO EM ESTUDO | 42 |
| 4.2.1 Condições de Fronteira..... | 43 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 47 |
| 5.1 ANÁLISE DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA NAS DIFERENTES ESTAÇÕES..... | 47 |
| 5.1.1 BRAGANÇA | 48 |
| 5.1.2 OVAR | 50 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.1.3 | ÉVORA..... | 53 |
| 5.1.4 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 56 |
| 5.2 | ANÁLISE DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA AOS DIFERENTES PARÂMETROS SELECIONADOS | 57 |
| 5.2.1 | EFICIÊNCIA DAS ABERTURAS | 57 |
| 5.2.2 | Rugosidade..... | 61 |
| 5.2.3 | Absortividade | 64 |
| 5.2.4 | Fracção da área das aberturas | 67 |
| 5.2.5 | Espessura da cavidade | 72 |
| 5.3 | ANÁLISE DO DESEMPENHO NAS DIFERENTES ORIENTAÇÕES DO EDIFÍCIO | 75 |
| 5.4 | ANÁLISE DA SOLUÇÃO MISTA..... | 82 |
| 6 | CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 85 |
| 6.1 | CONCLUSÕES | 85 |
| 6.2 | DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 87 |
| | BIBLIOGRAFIA | 89 |

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.1 EVOLUÇÃO DAS FACHADAS EM PORTUGAL [2]. | 8 |
| FIGURA 2.2 ISOLAMENTO TÉRMICO APLICADO NA CAIXA-DE-AR (A) E ISOLAMENTO TÉRMICO APLICADO PELO EXTERIOR (B) [2]. | 9 |
| FIGURA 2.3 ELEMENTOS QUE COMPÕEM UMA FACHADA VENTILADA [4]. | 15 |
| FIGURA 2.4 CORTE VERTICAL DA SECÇÃO DO EDIFÍCIO QUE MOSTRA A LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA E DOS MEDIDORES DE FLUXO NA (A) FACHADA VENTILADA (B) FACHADA CONVENCIONAL [24]. | 22 |
| FIGURA 2.5 BALANÇO TÉRMICO DO DEFLECTOR (A) E DA CAVIDADE (B) [23]. | 24 |

Capítulo 3

| | |
|---|----|
| FIGURA 3.1 MODELO PROPOSTO POR GRIFFTH PARA CAVIDADES NATURALMENTE VENTILADAS [24]. | 30 |
| FIGURA 3.2 BALANÇO TÉRMICO NO DEFLECTOR [24]. | 31 |
| FIGURA 3.3 BALANÇO TÉRMICO NA CAVIDADE | 33 |

Capítulo 4

| | |
|--|----|
| FIGURA 4.1 PARÂMETROS DO OBJECTO <i>EXTERIOR NATURAL VENTED CAVITY</i> . | 40 |
| FIGURA 4.4.2 PERSPECTIVA DO EDIFÍCIO MODELO. | 43 |

Capítulo 5

| | |
|---|----|
| FIGURA 5.1 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DE INVERNO PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES. | 48 |
| FIGURA 5.2 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DE VERÃO PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES. | 49 |
| FIGURA 5.3 RAZÃO DE CONSUMO ENTRE O EDIFÍCIO COM E SEM FACHADA VENTILADA. | 49 |
| FIGURA 5.4 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DE INVERNO PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES. | 50 |
| FIGURA 5.5 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DE VERÃO PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES. | 51 |
| FIGURA 5.6 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DO OUTONO PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES. | 51 |
| FIGURA 5.7 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DA PRIMAVERA PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES. | 52 |
| FIGURA 5.8 RAZÃO DE CONSUMO ENTRE O EDIFÍCIO COM E SEM FACHADA VENTILADA. | 52 |
| FIGURA 5.9 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DE INVERNO PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES. | 53 |
| FIGURA 5.10 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DE VERÃO PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES. | 54 |
| FIGURA 5.11 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DO OUTONO PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES. | 54 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 5.12 VARIAÇÃO DO CONSUMO NA ESTAÇÃO DA PRIMAVERA PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES..... | 55 |
| FIGURA 5.13 RAZÃO DE CONSUMO ENTRE O EDIFÍCIO COM E SEM FACHADA VENTILADA. | 55 |
| FIGURA 5.14 RESULTADOS DE BRAGANÇA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 58 |
| FIGURA 5.15 RESULTADOS DE OVAR: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 59 |
| FIGURA 5.16 RESULTADOS DE ÉVORA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 59 |
| FIGURA 5.17 GRAU DIA GANHOS NO INVERNO PARA AS TRÊS CIDADES..... | 60 |
| FIGURA 5.18 GRAU DIA GANHOS NO VERÃO PARA AS TRÊS CIDADES. | 60 |
| FIGURA 5.19 RESULTADOS DE BRAGANÇA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO..... | 62 |
| FIGURA 5.20 RESULTADOS DE OVAR: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 62 |
| FIGURA 5.21 RESULTADOS DE ÉVORA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 62 |
| FIGURA 5.22 GRAU DIA GANHOS NO INVERNO PARA AS TRÊS CIDADES..... | 63 |
| FIGURA 5.23 GRAU DIA GANHOS NO VERÃO PARA AS TRÊS CIDADES | 63 |
| FIGURA 5.24 RESULTADOS DE BRAGANÇA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO..... | 65 |
| FIGURA 5.25 RESULTADOS DE OVAR: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 65 |
| FIGURA 5.26 RESULTADOS DE ÉVORA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 65 |
| FIGURA 5.27 GRAU DIA GANHOS NO INVERNO PARA AS TRÊS CIDADES..... | 66 |
| FIGURA 5.28 GRAU DIA GANHOS NO VERÃO PARA AS TRÊS CIDADES. | 66 |
| FIGURA 5.29 RESULTADOS DE BRAGANÇA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO..... | 68 |
| FIGURA 5.30 RESULTADOS DE OVAR: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 68 |
| FIGURA 5.31 RESULTADOS DE ÉVORA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 68 |
| FIGURA 5.32 GRAU DIA GANHOS NO INVERNO PARA AS TRÊS CIDADES..... | 69 |
| FIGURA 5.33 GRAU DIA GANHOS NO VERÃO PARA AS TRÊS CIDADES | 69 |
| FIGURA 5.34 RESULTADOS DE BRAGANÇA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO..... | 70 |
| FIGURA 5.35 RESULTADOS DE OVAR: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 70 |
| FIGURA 5.36 RESULTADOS DE ÉVORA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 70 |
| FIGURA 5.37 GRAU DIA GANHOS NO INVERNO PARA AS TRÊS CIDADES..... | 71 |
| FIGURA 5.38 GRAU DIA GANHOS NO VERÃO PARA AS TRÊS CIDADES. | 71 |
| FIGURA 5.39 RESULTADOS DE BRAGANÇA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO..... | 72 |
| FIGURA 5.40 RESULTADOS DE OVAR: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 73 |
| FIGURA 5.41 RESULTADOS DE ÉVORA: (A) CONSUMO EM AQUECIMENTO E (B) CONSUMO EM ARREFECIMENTO. | 73 |
| FIGURA 5.42 GRAU DIA GANHOS NO INVERNO PARA AS TRÊS CIDADES..... | 74 |
| FIGURA 5.43 GRAU DIA GANHOS NO VERÃO PARA AS TRÊS CIDADES | 74 |
| FIGURA 5.44 COMPORTAMENTO DAS DIFERENTES FACHADAS NAS VÁRIAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA A ESTAÇÃO DE INVERNO EM BRAGANÇA..... | 76 |
| FIGURA 5.45 COMPORTAMENTO DAS DIFERENTES FACHADAS NAS VÁRIAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA A ESTAÇÃO DE VERÃO EM BRAGANÇA..... | 77 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 5.46 COMPORTAMENTO DAS DIFERENTES FACHADAS NAS VÁRIAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA A ESTAÇÃO DE INVERNO EM OVAR. | 78 |
| FIGURA 5.47 COMPORTAMENTO DAS DIFERENTES FACHADAS NAS VÁRIAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA A ESTAÇÃO DE VERÃO EM OVAR. | 79 |
| FIGURA 5.48 COMPORTAMENTO DAS DIFERENTES FACHADAS NAS VÁRIAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA A ESTAÇÃO DE INVERNO EM ÉVORA..... | 80 |
| FIGURA 5.49 COMPORTAMENTO DAS DIFERENTES FACHADAS NAS VÁRIAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA A ESTAÇÃO DE VERÃO EM ÉVORA..... | 81 |

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 4

| | |
|--|----|
| TABELA 4.1 VALORES DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES..... | 41 |
| TABELA 4.2 CONSTITUIÇÃO DO EDIFÍCIO. | 44 |

Capítulo 5

| | |
|--|-------------------------------------|
| TABELA 5.1 VALORES DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO 15 | 82 |
| TABELA 5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 15 PARA A CIDADE DE ÉVORA | ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO. |
| TABELA 5.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 15 PARA A CIDADE DE OVAR..... | ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO. |
| TABELA 5.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 15 PARA A CIDADE DE BRAGANÇA..... | ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO. |

LISTA DE ACRÓNIMOS

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

ETICS - *External Thermal Insulation Composite Systems with rendering*

CFD - *Computational Fluid Dynamic*

AVAC - aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

PCM's - *Phase Change Materials*

BLAST - *Building Loads Analysis and System Thermodynamics*

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*

LISTA DE SÍMBOLOS

h_{co} – Coeficiente de convecção para a superfície do deflector em contacto com o exterior

$h_{c,cav}$ – Coeficiente de convecção para a superfície do deflector em contacto com a cavidade

T_{amb} – Temperatura ambiente do exterior

$T_{s,baf}$ – Temperatura da superfície do deflector

$T_{a,cav}$ – Temperatura do ar no interior da cavidade

I_s – Radiação solar incidente de todos os tipos

α – Absortividade solar do deflector

$h_{r,sol}$ – Coeficiente de radiação linearizado para o sol

$h_{r,amb}$ – Coeficiente de radiação linearizado para o ambiente exterior

$h_{r,céu}$ – Coeficiente de radiação linearizado para o céu

$h_{r,cav}$ – Coeficiente de radiação linearizado para a superfície de transferência de calor subjacente

$T_{céu}$ – Temperatura do céu

T_{so} – Temperatura da face exterior da superfície de transferência de calor adjacente

\dot{m}_{vent} – Caudal mássico de ar devido a forças naturais [kg/s]

ρ – Densidade volúmica do ar

GD_{Ganhos} - Graus Dias Ganhos

$GD_{Verão,Primavera}$ - Graus dias para a estação de Verão e Primavera

$GD_{Inverno,Outono}$ - Graus dias para a estação de Inverno e Outono

T_{sfv} - Temperatura da superfície exterior do edifício sem fachadas ventiladas

T_{cfv} – Temperatura da superfície exterior do edifício com fachadas ventiladas

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo abordam-se essencialmente os
objectivos gerais e as motivações deste trabalho.

Faz-se ainda o enquadramento do trabalho e
apresenta-se a estrutura do documento escrito.

1.1 Introdução

Com a entrada em vigor dos novos regulamentos na área de consumo energético de edifícios, nomeadamente a introdução do sistema de certificação energética de edifícios, renovados desafios no que respeita à caracterização do comportamento térmico do parque construtivo. Neste contexto, para uma maior eficiência energética, a simulação do comportamento térmico de edifícios adquire particular importância, tornando-se uma ferramenta indispensável. Como consequência do sistema de certificação, assistimos à necessidade de criar novas estruturas capazes de reduzir o consumo energético e, melhorar o conforto térmico no interior das habitações. A cobertura e as fachadas de um edifício são as zonas mais sensíveis, os locais por onde são efectuadas trocas de calor, dado que estão em permanente contacto com o meio exterior. As fachadas, à semelhança da pele no Ser Humano, funcionam como uma barreira selectiva, mantendo as condições de conforto térmico interiores, face às condições climáticas exteriores.

As fachadas ventiladas são uma das novas soluções construtivas utilizadas actualmente pelos técnicos com o objectivo de reduzir as trocas de calor com o exterior, diminuindo os gastos a nível energético, e, consequentemente o aumento do conforto térmico no interior do edifício. As fachadas ventiladas podem ser definidas como um sistema de protecção e de revestimento exterior de edifícios, cuja principal característica

é a existência de uma caixa-de-ar em movimento, resultante do afastamento entre a parede do edifício e o revestimento.

A simulação do comportamento térmico dos edifícios é uma outra solução de que actualmente dispomos, uma ferramenta indispensável e, com particular importância na fase de projecto do edifício. O projectista, com esta ferramenta, pode fazer uma avaliação antecipada do comportamento térmico do edifício, e, de acordo com os resultados, fazer ajustes ou mesmo alterações no projecto final, que, em outras fases da vida do edifício se tornariam mais difíceis e mais onerosas de realizar.

1.2 Objectivos

As fachadas ventiladas são uma solução construtiva com um grande potencial enquanto elemento de climatização e de ventilação. Neste contexto, o presente trabalho de mestrado tem como objectivo principal analisar do ponto de vista térmico, a solução construtiva, fachadas ventiladas, no sentido de potenciar a utilização das diferentes vantagens desta técnica construtiva. Para o efeito recorre-se a um software adequado para avaliar o desempenho em diferentes condições de funcionamento.

São ainda objectivos específicos:

1. Caracterizar o desempenho das fachadas ventiladas em três zonas climáticas diferentes do país;
2. Analisar a solução construtiva aos diferentes parâmetros: eficiência das aberturas, rugosidade, absortividade, fracção da área das aberturas e espessura da cavidade;
3. Verificar se o efeito “chaminé”ⁱ, como solução passiva de aquecimento solar na estação fria, e, de extracção natural na estação quente, reduz os consumos energéticos;

ⁱ Efeito chaminé – o ar entra frio pela parte inferior e sai quente pela parte superior.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. Neste primeiro capítulo faz-se uma introdução e enquadramento do trabalho, indicando de forma sumária as motivações que levaram ao desenvolvimento do mesmo.

No Capítulo 2 definem-se genericamente a evolução das fachadas em Portugal e os vários estudos realizados em edifícios com fachadas duplas.

No Capítulo 3 descreve-se a base teórica do modelo matemático utilizado na simulação de edifícios com fachadas ventiladas, bem como uma breve introdução aos programas utilizados.

No Capítulo 4 descreve-se a metodologia utilizada na simulação, bem como o edifício em estudo e todas as variáveis de entrada.

O Capítulo 5 é dedicado à apresentação e discussão dos resultados da simulação térmica do edifício em estudo.

Finalmente, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões gerais retiradas deste trabalho, assim como algumas perspectivas de trabalhos futuros.

1.4 Terminologia Utilizada

Foram usados termos em língua estrangeira em situações em que não exista uma tradução apropriada ou exacta para a língua portuguesa, ou se a tradução induzisse o leitor em erro. Sempre que ajudar à compreensão do texto, será indicada a tradução dos termos técnicos escritos em português.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo é apresentada, genericamente a evolução das fachadas em Portugal e os tipos de isolamentos pelo exterior actualmente aplicados. Apresentam-se vários estudos realizados para fachadas duplas. Na secção 2.4 descrevem-se vários estudos realizados em fachadas ventiladas.

2.1 Enquadramento

Desde os tempos primitivos, o Homem sentiu necessidade de se proteger contra as adversidades climáticas e dos animais selvagens. Para tal foi obrigado a construir abrigos inspirando-se e utilizando matérias-primas da própria natureza, que foram evoluindo ao longo do período de sedentarização humana. Os materiais e sistemas utilizados na construção das habitações foram muitos e diversificados, tendo em conta o clima ou as diferentes solicitações, de acordo com uma função específica. Resolvido o problema de protecção, sentiu-se a necessidade de iluminar e ventilar o interior da habitação, e, para tal, recorreu-se à abertura de janelas e portas.

As habitações são constituídas por fachadas e por coberturas que permitem a separação e um maior isolamento do meio exterior, e, tal, como no corpo humano, funcionam como uma “pele” que reveste e protege das agressões do meio exterior.

Uma das principais funções da fachada é a de conseguir funcionar como uma barreira selectiva face às condições climáticas exteriores, de forma a manter condições de conforto térmico interiores sem recurso a sistemas mecânicos de climatização, ou pelo menos reduzindo ao mínimo a necessidade de recorrer aos mesmos [1].

Os factores mais importantes a serem tomados em consideração com vista à obtenção do conforto interior dos edifícios são: temperatura do ar interior, que no Inverno deve ser mantida nos 20°C e no Verão entre os 23 e os 26°C; a humidade relativa, normalmente situada entre os 30 e 70 %; a heterogeneidade na temperatura radiante; a taxa de renovação do ar e a velocidade do ar. Existem certas características da “pele” exterior que vão condicionar as trocas de calor entre o interior e o exterior, e as perdas por condução e convecção, e essas características vão influenciar a temperatura ambiente e a temperatura radiante. Essas características são: relação entre a área de fachada opaca e a área de fachada transparente ou translúcida, que varia conforme o tipo de clima; relação entre as zonas abertas e fechadas da caixilharia que permitem a ventilação natural e a renovação de ar de uma forma controlada; factor de obstrução que é a percentagem da radiação que passa através dum elemento transparente com áreas opacas, Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) e Factor Solar (g) que é o quociente entre a energia que entra através do elemento transparente ou translúcido e a radiação que nele incide.

Ao longo de décadas a concepção das fachadas tem sofrido um vasto e continuo aperfeiçoamento, desde a forma como são executadas, ao tipo de material utilizado na envolvente.

2.2 Evolução das fachadas em Portugal

Em Portugal as fachadas exteriores dos edifícios eram inicialmente paredes simples de pedra, taipa, adobe e outros materiais, posteriormente passaram a ser construídas em tijolo de barro, Figura. 2.1. Devido à reduzida investigação realizada sobre este tipo de material, surgiram alguns problemas, tais como a abertura de fendas que proporcionavam infiltrações de água. A solução para este problema surgiu na década 50 com o aparecimento de paredes duplas, em que o pano exterior era realizado em alvenaria de pedra enquanto o pano interior era de alvenaria de tijolo. Na década de 60 a constituição das paredes foi aligeirada com a utilização de paredes de alvenaria de tijolo vazado em ambos os panos, apresentando o pano exterior uma espessura significativamente maior que a do interior. Assistiu-se a uma progressiva redução dessa espessura e, nos anos

70, era já usual a utilização de dois panos com dimensões idênticas, e por vezes muito reduzidas. Na década seguinte regista-se um aumento das exigências de conforto higrotérmico, de forma a dar resposta às preocupações com o consumo de energia e de protecção ambiental, através da utilização de materiais de isolamento térmico. O material de isolamento térmico era utilizado para preencher, total ou parcialmente, a caixa-de-ar das paredes, de forma a minimizar as trocas de calor com o exterior. A utilização desta solução teve como consequência uma redução nas necessidades de aquecimento/arrefecimento e uma diminuição nos riscos de ocorrência de condensações.

Com a entrada em vigor do RCCTE, na década de 90, assistiu-se a um grande interesse no tratamento das pontes térmicas. Uma ponte térmica é qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada em relação à zona corrente. Essa alteração pode ser causada pela existência localizada de materiais de diferentes condutibilidades térmicas por uma modificação na geometria da envolvente, como é o caso das ligações entre diferentes elementos construtivos [2].

Em 2000 começaram a ser introduzidos diferentes sistemas de isolamento térmico, quer pelo interior, quer pelo exterior, melhorando o conforto térmico e controlando a temperatura no interior do edifício, reduzindo assim as perdas e entradas de calor, respectivamente durante a estação fria e a estação quente. Com a utilização desta aplicação, atinge-se o conforto térmico através da redução das trocas de calor entre o interior e o exterior do edifício, funcionando a fachada com uma verdadeira “pele” exterior de protecção.

Estas alterações têm sido realizadas no sentido de melhorar o nível de isolamento e a reduzir as trocas de calor com o exterior, diminuindo assim os gastos a nível energético, e, conseqüentemente, o aumento do conforto térmico no interior do edifício.

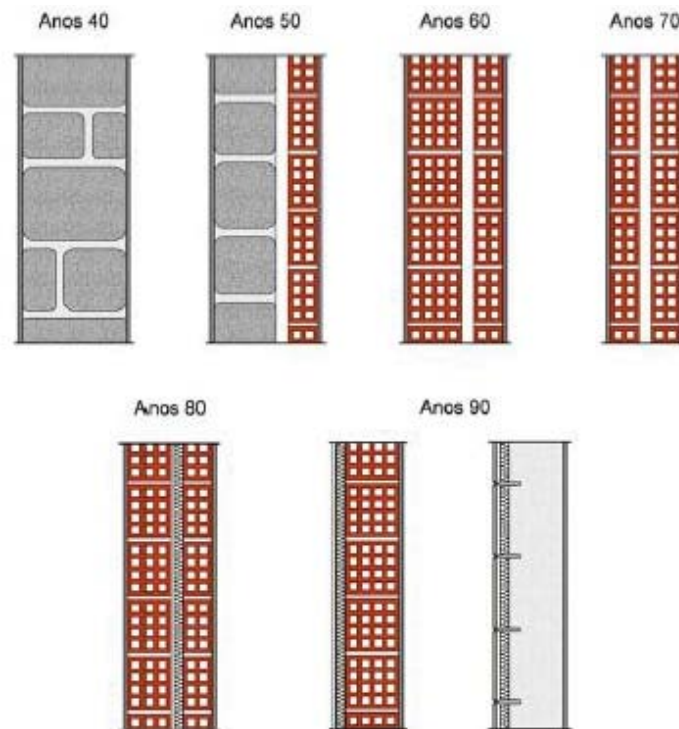


Figura 2.1 Evolução das fachadas em Portugal [2].

2.3 Tipos de isolamento da fachada

O isolamento das paredes exteriores pode ser alcançado por três vias, tal como se pode observar na Figura 2.2: pelo exterior do edifício, pelo interior do edifício ou na caixa-de-ar (no caso das paredes duplas).

O isolamento pelo exterior, quando possível, apresenta sempre vantagens em relação à aplicação pelo interior, pois permite a eliminação das pontes térmicas e a preservação da inércia térmica no interior do edifício. Os materiais compactos, como as paredes de elevada espessura, apresentam grande inércia térmica, ou seja, têm grande capacidade de armazenamento térmico, quer a energia provenha de radiação solar ou de outra fonte de aquecimento.

Esta característica dos materiais permite que no inverno estes absorvam e armazenem calor, libertando-o depois para o interior do edifício, aquecendo-o assim de forma natural. No Verão, a inércia térmica retarda o sobreaquecimento no interior, dificultando a entrada de radiação solar [3]. Geralmente, os sistemas de isolamento térmico pelo exterior são aplicados sobre um suporte constituído por uma parede em alvenaria ou em betão armado.

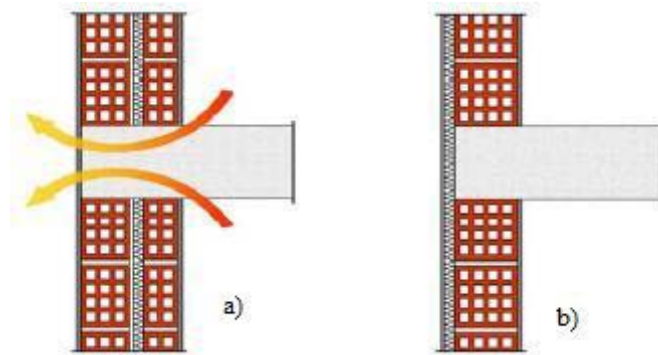


Figura 2.2 Isolamento Térmico aplicado na caixa-de-ar (a) e isolamento térmico aplicado pelo exterior (b) [2].

Têm sido desenvolvidos diferentes sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior, que são utilizados tanto em reabilitação como em novos edifícios, sendo uma óptima solução tanto do ponto de vista energético como do ponto de vista construtivo.

De um modo geral, os sistemas de isolamento pelo exterior são constituídos por uma camada de isolamento térmico aplicada sobre o suporte e um paramento exterior para protecção, em particular, das solicitações climáticas e mecânicas.

O isolamento térmico pelo exterior é hoje reconhecido de forma incontestável como uma solução técnica de alta qualidade, pois permite de uma forma geral a redução das pontes térmicas, a diminuição do risco de condensações, o aumento da inércia térmica interior dos edifícios e a diminuição das necessidades de aquecimento e arrefecimento [2].

2.3.1 Isolamento da fachada pelo exterior

De um modo geral as fachadas com revestimento pelo exterior podem ser classificadas em três grandes famílias:

1. revestimentos descontínuos fixados ao suporte através de uma estrutura intermédia – fachadas ventiladas;
2. componentes pré-fabricados constituídos por um isolamento e um paramento, fixados directamente ao suporte – *vêture* [2] ;
3. rebocos armados directamente e aplicados sobre o isolamento térmico – ETICS, ou também conhecidos como revestimento de Capotto [2].

As fachadas ventiladas podem ser definidas como um sistema de protecção e de revestimento exterior de edifícios, cuja principal característica é a existência de uma caixa-de-ar em movimento, resultante do afastamento entre a parede do edifício e o revestimento. O adjectivo “ventilada” deriva, exactamente, desta caixa-de-ar que permite a ventilação natural e contínua da parede do edifício, através do efeito de chaminé [4].

As fachadas ventiladas são uma solução construtiva muito eficiente na resolução de problemas de isolamento térmico dos edifícios, com elevadas prestações e aplicações em edifícios verticais, permitindo ao mesmo tempo conceber projectos de elevada qualidade estética e funcional.

Uma fachada ventilada é constituída por duas fachadas que se encontram separadas por um canal por onde circula o ar. Este canal pode estar aberto ou fechado. Quando o canal se encontra em contacto com o ambiente exterior permite a movimentação de massa de ar, devido a variação da densidade do mesmo e dos gradientes de temperatura. A ventilação que decorre da movimentação, denominada efeito chaminé, produz a renovação do fluxo de calor através da fachada. Este efeito aumenta à medida que a temperatura externa e a radiação aumentam. Neste tipo de fachadas ocorre a transmissão de calor segundo mecanismos de condução, convecção e radiação, e a transferência de calor ocorre devido:

- convecção e radiação entre o exterior e a face externa revestida, incluindo a radiação solar;
- radiação entre as duas paredes da caixa de ar;
- convecção entre as paredes da cavidade e a massa de ar circulante;
- condução através das paredes;
- coeficiente global de transmissão de calor entre a parede opaca e o ambiente interior tomando em consideração as trocas por convecção e radiação.

A utilização de fachadas ventiladas na construção de edifícios desempenha um duplo papel, contribuindo quer para a viabilidade estética, quer para a eficiência energética e ecológica dos edifícios.

2.4 Estado da Arte

A preocupação em reduzir os gastos em aquecimento e arrefecimento de edifícios tem vindo a aumentar nos últimos anos. Vários estudos teóricos e práticos, bem como programas demonstrativos sobre o aquecimento e arrefecimento solar passivo, têm sido amplamente estudados em vários países [5,6]. De acordo com Balocco (2001), um dos grandes problemas das fachadas ventiladas é o sobreaquecimento que pode ocorrer em muitos edifícios durante a estação quente [7].

Diferentes tipos de dispositivos foram utilizados com o objectivo de obter uma melhor eficiência energética. A redução dos gastos de energia, no aquecimento e arrefecimento dos edifícios, depende muito do tipo de fachadas utilizadas e do ambiente onde estas são inseridas, pelo que a forma aplicada destes dispositivos tem sido muito diversificada, como são exemplo as paredes de trombe, as chaminés solares, as fachadas ventiladas e as fachadas duplas translúcidas.

Estudos experimentais foram realizados utilizando chaminés solares e paredes de trombe, e os resultados da sua performance térmica foram comparados com simulações numéricas. Os resultados apontam para um significativo aumento na taxa de ventilação com a utilização de chaminés solares, quando foi tomada em linha de conta a variação do clima e o armazenamento de calor nas paredes da chaminé [5,6].

Ferro, Sacchi e Saggese (1975), citado por Balocco (2001), referem que um dos problemas básicos a ser controlado, e que deverá ser tomado em consideração, diz respeito aos parâmetros que descrevem o desempenho energético destes sistemas termodinâmicos complexos. Todos os parâmetros estão interligados, assim como as condições climáticas no interior e no exterior do edifício, nomeadamente a complexidade dos códigos para a energia, dependem também das dificuldades associadas e das definições das condições limite, quando se utiliza o programa CFD. A fachada ventilada é um sistema termodinâmico multifuncional usado para combinar os aspectos do exterior e o comportamento do edifício. O canal de ar pode funcionar de forma isolada ou estar interligado com um sistema de AVAC e a sua fonte pode ser interna ou externa [5].

As fachadas duplas (*Double skin facades*) são constituídas por duas camadas de fachadas separadas por uma cavidade. Existem vários tipos de configurações que variam com o tipo de cavidade, material utilizado em cada fachada, a divisão da cavidade e os materiais de revestimento utilizados na cavidade [8].

Foram realizados vários estudos com o objectivo de avaliar a performance térmica em edifícios de escritórios com fachadas duplas. Hoseggen, Wachenfeldt e Hanssen (2007) investigaram um edifício no centro de Trondheim – Noruega, com o objectivo de observar se se verificava uma diminuição nos gastos em aquecimento. Utilizando o programa de simulação de energia ESP-r (*Department of Mechanical Engineering - United Kingdom*) o edifício foi simulado com e sem uma fachada dupla na zona Este. Os resultados da simulação evidenciaram que quando era utilizada uma fachada única com janelas simples, os gastos em aquecimento eram 20% superiores, quando comparados com uma fachada dupla. No entanto, os investigadores concluíram que as poupanças na energia não eram suficientes para justificar a colocação de uma fachada dupla no edifício [9].

Gratia e Herde (2006) são da opinião que a eficiência de uma fachada dupla depende de muitos factores, salientando o tipo e a aplicação do edifício, a orientação, o nível de isolamento, a proporção de janelas ou paredes opacas na parede interna, a posição dos sistemas de sombreamento (*shading devices*), a qualidade e a dimensão das aberturas para o exterior da fachada dupla. O estudo tinha como objectivo avaliar o impacto de uma fachada dupla nos consumos de energia para três níveis de isolamento, e de acordo com a orientação da fachada. Utilizando o programa TAS (*EDSL Ltd - United Kingdom*) verificaram que a utilização de uma fachada dupla apresenta um fraco desempenho quando comparada com a utilização dos níveis de isolamento, os níveis de ganho interno e a utilização de estratégias de arrefecimento natural [10].

Saelens, Roels e Hens (2006) compararam três tipos de fachadas translúcidas duplas com o objectivo de perceber qual o tipo de fachada mais eficaz. Os três tipos de fachadas, colocados de forma alternada com o sistema AVAC, foram utilizados num edifício de escritórios na Bélgica. Uma primeira fachada era uma janela com ventilação mecânica, a segunda consistia numa fachada dupla com ventilação natural e uma terceira numa cavidade mecanicamente ventilada com o ar do exterior. Os investigadores observaram que a primeira fachada apresentou uma estratégia mais eficiente na recuperação do ar para aquecimento. Verificaram também, que foi necessário combinar duas tipologias numa só numa só estratégia, dado que uma só, não conseguia diminuir os consumos de energia, durante o aquecimento e o arrefecimento. Concluíram que, controlando a taxa da corrente de ar, os consumos de energia reduziram para os três tipos de fachadas [11].

A necessidade de reduzir os consumos dos sistemas de AVAC levou a que vários investigadores procurassem novas soluções para os sistemas de ventilação, ou mesmo tentar conjugar os sistemas de AVAC com outro tipo de fachadas. Stec e Paassen (2004)

compararam a performance de vários tipos de fachadas para o clima holandês, e concluíram que do ponto de vista económico e térmico os edifícios com fachada dupla apresentam uma performance mais competitiva. Salientam ainda que a fachada dupla deve ser uma parte integrante do sistema AVAC e que a ventilação natural é uma componente muito importante na redução do sistema de arrefecimento [12].

As preocupações com a diminuição do consumo de energia, não esquecendo a parte ambiental que deverá também ser preservada, levam ao desenvolvimento de novas tecnologias e novos materiais com o objectivo de isolar termicamente a envolvente dos edifícios, de modo a minimizar as trocas de calor com o exterior.

Neste contexto, surgiram recentemente os materiais de mudança de fase (PCM's - *Phase Change Materials*) que se tornaram um novo material de construção com o objectivo de estabilizar a temperatura nos edifícios, recorrendo às propriedades inerentes à sua mudança de fase, e originando consequentemente, o aumento da eficiência energética dos edifícios.

Os PCM's têm como principal característica a sua mudança de fase, da fase líquida para a fase sólida e vice-versa, a uma temperatura constante, que poderá ser próxima da temperatura ambiente desejada. Estes materiais, são compostos que a uma determinada temperatura se encontram no estado sólido e que quando a temperatura aumenta fundem, absorvendo e armazenando energia. Quando a temperatura baixa comportam-se de maneira inversa, ocorrendo a sua solidificação e a consequente libertação de energia [13]. Apesar desta capacidade, a utilização dos PCM não elimina as necessidades de aquecimento (no Inverno) nem de arrefecimento (no Verão), mas diminui a energia utilizada naqueles processos, devido ao seu efeito regularizador.

Vários estudos descrevem em que medida as fachadas duplas devem actuar de maneira a melhorar a eficiência energética dos edifícios. Pasquay's (2004) estudou o desempenho energético de três edifícios com fachadas duplas, na Alemanha (Nordrhein - Westfalen). O investigador concluiu que a energia pode ficar armazenada em locais específicos, quando comparada com soluções convencionais com ar condicionado. No entanto, o autor é da opinião que a utilização de fachadas duplas não deve ser utilizada de forma indiscriminada, dado que cada edifício deverá ser analisado independentemente, tendo em conta a sua localização [14].

2.5 Fachadas Ventiladas

Como referido, as fachadas têm sofrido uma grande evolução ao longo dos anos com o aparecimento de novos materiais e de novos sistemas construtivos, realçando o isolamento feito pelo exterior dos edifícios, e a criação de uma camada protectora da parede. As soluções apresentadas pela investigação realizada têm evoluído para soluções mais leves, compostas por uma serie de camadas com funções cada vez mais específicas. De acordo com esta tendência surgiram as fachadas ventiladas, que contribuíram para a economia da energia, evitando pontes térmicas e acarretando uma maior qualidade e conforto para o edifício [15]

Uma fachada ventilada é constituída por vários componentes, um conjunto de subestruturas de suporte e apoio à parede, uma lâmina de isolamento exterior à parede de suporte, uma caixa-de-ar activa entre a lâmina de isolamento e o painel exterior e um painel exterior de revestimento. (Todos os componentes podem variar em função da zona geográfica, bem como da orientação da fachada e de acordo com a exigência do edifício em questão). É importante que a caixa-de-ar garanta uma boa circulação do ar. O aquecimento da caixa-de-ar dá origem a um fluxo ascendente no interior da caixa, e a diferença de pressões no seu interior. O fluxo de ar ascendente é resultado do aquecimento do ar no interior da caixa, e as diferenças de pressão no interior da câmara-de-ar ventilada, devido à acção do vento, também contribuem para a ventilação.

Existem vários materiais que podem ser utilizados no painel exterior de revestimento, tais como: betão polimérico, alumínio perfilado, placa composta sanduíche de alumínio, vidro, cerâmica, pedra, painel de resina fenólica, madeira modificada e placas de fibrocimento. Cada material apresenta diferentes vantagens e diferentes tipos de aplicações que vão influenciar na inércia térmica do edifício, dado que cada material apresenta diferentes massas volúmicas, diferentes coeficientes de condutibilidade térmica, e diferentes pesos.



Figura 2.3 Elementos que compõem uma fachada ventilada [4].

As fachadas ventiladas apresentam inúmeras vantagens, de entre as quais se salientam um excepcional isolamento térmico, um bom isolamento acústico, uma excelente impermeabilidade e excelente protecção dos componentes interiores do edifício, uma longa duração, e por último um elevado nível estético [4]. Adicionalmente permitem reduzir ou mesmo evitar a manutenção de fachadas.

Nos últimos anos as fachadas ventiladas têm sido objecto de estudo, quer do ponto de vista arquitectónico, pelo conteúdo estético e formal que esta escolha particular pode comportar, quer pela possibilidade da poupança energética conseguida com a aplicação das fachadas.

Balocco, Nistri e Bazzocchi (2001), avaliaram a tecnologia e o desempenho de uma fachada ventilada com revestimento de tijolo (*tavella in laterizio*). Utilizaram um edifício público que se encontrava em fase execução para a cidade de Mantova, Itália. A fachada ventilada em estudo foi montada sobre um edifício com um vão de 15 cm e um revestimento exterior com uma espessura de 5 cm.

Os autores desenvolveram um modelo simples que permite avaliar o comportamento termodinâmico da fachada ventilada colocada sobre o edifício. Desenvolveram um programa de cálculo útil e capaz de fornecer uma avaliação complexa do comportamento termodinâmico da estrutura. Para tal, assumiram condições de regime estacionário e consideraram todos os parâmetro envolvidos no balanço energético, assim como todos os termos relacionados com o fluxo de calor ao longo do vão. O programa resolve, através de um método iterativo, um sistema de equações derivadas do balanço energético e mássico, e permite conhecer:

1. a evolução e distribuição da temperatura da fachada ventilada, da superfície externa e interna do revestimento e da área interna do vão;

2. a quantidade de massa de ar que entra e sai ao longo do vão, as condições de humidade e temperatura, e a velocidade do ar no interior do mesmo;
3. o fluxo térmico que entra e sai no interior do edifício.

Com a análise dos resultados concluíram que a temperatura do ar dentro da caixa-de-ar aumenta à medida que a sua largura diminui e que, se a intensidade da radiação solar aumenta, provoca um aquecimento do ar ao longo do vão, visto que este é menos denso e tende a sair para o exterior. Verificaram também que a temperatura da superfície interna no revestimento exterior diminuía devido a vários factores tais como: a radiação solar incidente, o aumento da temperatura do ar exterior e a diminuição da temperatura do ar ao longo do vão. Por último, concluíram que as fachadas ventiladas reduzem consideravelmente o fluxo térmico no interior do edifício [16].

Segundo Balocco (2002), uma fachada ventilada é um sistema aberto, limitado por um número diferente de materiais (tijolo, vidro ou pedra, etc.) que deve apresentar os seguintes desempenhos básicos:

- permeabilidade do ar: tem que reduzir a dissipação de calor durante a estação do inverno e garantir o efeito passivo de arrefecimento no interior do edifício, durante o Verão, pela chaminé solar definida entre o exterior e a parede interna.
- impermeável: Deve garantir que não há nenhuma infiltração de água devido ao granizo ou capilaridade, e não deve haver condensação na superfície e na massa da parede.
- desempenho térmico: Deve garantir um isolamento térmico global e um conforto térmico interior.
- “*Skimmed façade*”: Deve combinar o ganho solar térmico com uma boa iluminação interna natural.

O autor levou a cabo uma investigação em que pretendia estudar e fornecer uma ferramenta simples e útil para o estudo do desempenho térmico das diferentes tipologias de fachadas ventiladas. Os resultados mostram que é possível obter um arrefecimento solar perceptível durante o Verão, quando há uma caixa-de-ar com uma chaminé superior

e uma largura de 7cm. Para cavidades largas, o efeito no arrefecimento torna-se estável. No Inverno, o isolamento térmico devido ao encerramento da fachada ventilada é muito importante. Analisando os resultados da simulação, verifica-se que a rugosidade do canal afecta a uniformidade e o fluxo de calor, a temperatura ao longo da superfície do canal varia e verifica-se que há perdas de pressão. O modelo de cálculo fixo foi utilizado para estudar o desempenho térmico da fachada ventilada, mas pode ser usado para comparar diferentes tipologias de fachadas [7].

No fim dos anos 90, no Brasil, Barth e Mendes (1999) analisaram o desempenho térmico de fachadas ventiladas com base no projecto da norma brasileira: Desempenho Térmico das Edificações. Desenvolveram um estudo teórico do comportamento térmico de alguns tipos de sistemas de fachadas com tijolos maciços cerâmicos, no qual estudaram seis tipos de construções diferentes:

1. parede simples de tijolos maciços sem reboco;
2. parede dupla de tijolos maciços sem reboco e com caixa-de-ar não ventilada;
3. parede dupla de tijolos com vão entre as paredes de 5cm, divididos em 2cm de caixa-de-ar não ventilada e camada de *isopor* de 3cm;
4. parede dupla de tijolos maciços com caixa-de-ar não ventilada de 5cm e barreira radiante;
5. parede dupla de tijolos maciços com caixa-de-ar ventilada de 5 cm;
6. parede dupla de tijolos maciços com vão entre as paredes de 5cm, divididos em 2cm de caixa-de-ar ventilada e 3cm de *isopor*.

Analisando os resultados verificaram que a parede dupla com ventilação, na situação de Inverno, apresenta um coeficiente de transferência de calor superior, quando comparada com a parede dupla sem ventilação na caixa-de-ar. No entanto, o valor do coeficiente de transferência de calor é inferior quando comparado com a parede simples. Isto deve-se ao facto de a fachada externa, apesar de não contribuir para o cálculo da resistência térmica do sistema, criar uma região menos turbulenta de ar ao longo da superfície externa da fachada interior, aumentando assim a resistência térmica da fachada. Observando os valores do fluxo verificaram que a fachada mais eficiente foi a fachada do tipo 3, em que as superfícies encontravam-se pintadas a branco. A cor da fachada exterior apresenta um grande melhoramento no desempenho térmico. Neste estudo, as fachadas simples pintadas de branco ostentaram melhores resultados quando

comparadas com fachadas mais complexas em que as superfícies estavam na cor natural do tijolo [17].

Barthe em (2001) realizou uma investigação com o objectivo de avaliar a temperatura e humidade de uma fachada ventilada na estação de Verão. Para tal, construiu um protótipo em madeira, material mais utilizado nas construções brasileiras, com duas divisórias de 3x4x2.8m. As duas salas encontravam-se orientadas segundo a zona Oeste, pois encontravam-se submetidas a maiores variações de temperatura. Posteriormente foi acrescentado às duas divisórias uma duplicação, também em madeira de 2mm, de modo a obter uma caixa-de-ar entre as duas paredes de 7cm. Na fachada externa duma das divisórias (A) realizaram-se aberturas de 25mm de forma a permitir a ventilação na caixa-de-ar.

A outra divisória foi mantida sem ventilação de forma a actuar como um elemento de controlo. Com este tipo de metodologia foi possível a avaliação de quatro tipos de fachadas:

- fachada simples;
- fachada dupla não ventilada;
- fachada dupla pouco ventilada;
- fachada dupla muito ventilada.

Os resultados evidenciam que na estação de Verão, a cavidade muito ventilada é a que apresenta melhor desempenho. A temperatura no interior da divisória diminui à medida que a intensidade da ventilação aumenta. Ou seja a caixa-de-ar actua como um acumulador de calor e provoca também um atraso na passagem de fluxo de calor [18].

Num outro estudo realizado por Barth e Grilo (2002) foi avaliar o desempenho do mesmo protótipo do estudo anterior mas durante a estação de Inverno. O objectivo deste estudo pretendia averiguar se a fachada ventilada não prejudicava o funcionamento na situação de Inverno, especialmente nas noites mais frias.

Os resultados permitiram concluir que a utilização de uma fachada dupla pouco ventilada permite que as temperaturas no interior sejam 3°C superiores às temperaturas do exterior. Isto acontece porque quando a radiação solar incide na caixa-de-ar provoca um aumento da convecção, possibilitando uma perda de calor controlada.

Os resultados dos dois estudos permitiram concluir que a duplicação da parede interna ajudou a melhorar o desempenho térmico da fachada [19]. Estes resultados deverão ser analisados tendo em conta o contexto onde a investigação foi realizada, dado que o clima

brasileiro exibe temperaturas muito diferentes do português, principalmente na estação de Inverno, apresentando nesta estação reduzidas variações de amplitude térmica.

Ciampi, Leccese e Tuoni (2002) analisaram um método analítico para projectos de aplicação capaz de fornecer todos os critérios úteis para a escolha de uma fachada ventilada mais aceitável, tanto para a ventilação forçada como para a ventilação natural. A análise térmica e física na caixa-de-ar ventilada requer um elevado conhecimento dos coeficientes de transferência de calor, factores de fricção e propriedades térmicas e físicas dos materiais. O estudo teve como principal objectivo analisar a influência dos parâmetros necessários para calcular o coeficiente de transmissão de calor no exterior da fachada e da rugosidade na parede que delimita a caixa-de-ar, no desempenho energético das fachadas ventiladas durante estação de arrefecimento.

Foram estudados dois casos de elevada importância. No primeiro caso considerou-se que a parede interna de alvenaria era fixa, e pretendia-se otimizar o canal de arejamento e o revestimento exterior. No segundo caso o revestimento exterior era fixo, pretendia-se otimizar a parede interna de alvenaria e o canal de arejamento.

Para o primeiro caso foram estudados 6 tipos de fachadas ventiladas, mantendo comum a fachada interior de tijolo perfurado e, sendo a fachada exterior de cada edifício constituída por um material diferente: chapa de cobre para a primeira, placa cerâmica para a segunda, painéis de cimianto para a terceira, placa fina de porcelanato para a quarta, tijolo perfurado para a quinta e, finalmente, painéis compósitos de *polyester* para a sexta fachada. Todas as fachadas apresentavam um isolamento de painéis de fibra de vidro com espessura de 0,04m na parede interna da caixa-de-ar. O principal objectivo era verificar qual dos 6 tipos de fachadas apresentava melhor desempenho relativamente à poupança energética. Variando a espessura do caixa-de-ar entre 0.06 a 0.30mm a fachada 2 foi aquela que apresentou maior eficiência.

No segundo caso foram estudados três tipos de fachadas, em que o revestimento exterior comum às três fachadas era de elementos de tijolo. As paredes internas eram também de tijolo aligeirado, mas variam a sua massa volúmica de 600 kg/m³ para a fachada 1, 1200 kg/m³ para a fachada 2 e 2000 kg/m³ para a 3 fachada foi aplicada o mesmo tipo de isolamento do utilizado no caso 1. Os resultados mostram que a fachada 1 apresenta poupanças energéticas relativamente superiores.

Analisando os resultados dos dois casos podemos concluir que:

- nos dois casos as poupanças energéticas aumentam à medida que a espessura da caixa-de-ar aumenta (espessura < 0.15mm);

- o posicionamento do isolamento térmico poderá não ser o mais eficiente do ponto de vista energético, mas o isolamento junto à parede interna de alvenaria, apresenta melhores resultados do que o que está junto ao revestimento exterior;
- solar a poupança energética varia directamente com a intensidade da radiação. Os materiais reflectores reduzem drasticamente o efeito da radiação solar. (À medida que a intensidade da radiação solar aumenta, as poupanças energéticas também aumentam);
- a poupança energética varia inversamente com a diferença de temperatura entre o interior e a exterior. (À medida que a diferença de temperatura entre o interior e o exterior diminui, as poupanças energéticas também aumentam);
- o projecto cuidadoso da fachada ventilada pode permitir uma poupança de energia de cerca de 40%, durante a estação de arrefecimento;
- as poupanças energéticas são influenciadas pelo valor da resistência térmica da fachada exterior e pela rugosidade relativa das paredes que delimita a caixa-de-ar.

Os resultados demonstraram que o desempenho das fachadas é influenciado pelo canal de arejamento, pela distribuição do material de isolamento, pela intensidade da radiação solar e pela resistência térmica da superficial da parede exterior [20].

Em 2003 Balocco propôs uma ferramenta capaz de comparar e conhecer térmica e fisicamente o desempenho energético de diferentes projectos de fachadas naturalmente ventiladas, através de uma análise adimensional. As 14 variáveis adimensionais resolvidas podem ser usadas para descrever o desempenho térmico e energético de diferentes tipos de fachadas, mas em particular se a fachada externa for realizada em vidro [21].

L. Aelenei, A. Rodrigues e D. Aelenei (2004) realizaram um estudo com o objectivo de avaliar o fluxo de calor que atravessa um conjunto de dois panos de parede, de que é especialmente necessário numa análise completa do desempenho térmico global do sistema. Para tal, construíram um protótipo experimental e ensaiaram com ajuda de uma câmara de climática. O protótipo consistia em duas placas de gesso de 2.4x0.7x0.0125m. Efectuou-se a medição da temperatura em diferentes alturas. Desenvolveram também um programa em CFD, para simular os fenómenos de condução-convecção que se

geram no interior da caixa-de-ar. Os resultados da simulação foram comparados com os resultados dos ensaios experimentais, permitindo uma validação dos modelos físico - matemáticos utilizados no programa. Realizaram-se também um ensaio experimental com o objectivo de avaliar o desempenho térmico de uma parede dupla com caixa-de-ar não ventilada. Foram efectuados estudos numéricos e experimentais para três espessuras diferentes da caixa-de-ar e quatro condições de temperatura do ambiente, tanto para a situação de caixa-de-ar ventilada como para a não ventilada.

Os resultados evidenciaram que, na situação em que a cavidade é ventilada o aquecimento do ar está confinado à região adjacente à parede mais quente. Na situação da cavidade não ventilada o ar é termicamente estratificado e a parede dupla funciona como uma barreira estanque à passagem do calor. Analisando os resultados da simulação verificaram que no caso da cavidade ventilada o campo de velocidades apresenta um sentido uniforme, sendo de maior intensidade na vizinhança da parede mais quente. No outro caso, o escoamento é no sentido ascendente na proximidade da parede quente, e descendente junto da parede menos quente.

Quando foi calculado o valor do coeficiente global de transferência de calor, os resultados demonstram que este diminui com o aumento da espessura entre os panos.

No caso da cavidade não ventilada, verificou-se que esta apresenta um melhor desempenho no Inverno, em resultado de as perdas térmicas serem inferiores na estação fria. Assim se o objectivo da fachada for reduzir as perdas térmicas no Inverno, a solução da cavidade fechada apresenta melhor desempenho. Já na estação de arrefecimento concluíram que a cavidade ventilada apresentava melhores resultados [22].

Griffith (2006) desenvolveu um modelo para cavidades naturalmente ventiladas, formadas por deflectores leves, colocados na fachada exterior dos edifícios. O modelo separa os balanços energéticos no deflector e na caixa-de-ar. O modelo foi apenas testado para um sótão com um sistema de painéis fotovoltaicos, mas na opinião do autor, o mesmo modelo pode ser aplicado a todo o tipo de construções que partilhem as seguintes características:

- caixa-de-ar localizada perto do exterior;
- grande parte da construção é direccionada ao interior;
- barreira exterior opaca com aberturas que permitam o fluxo de ar de e para o exterior [23].

Em 2007 os investigadores Muller, Oliveira, Guths e Alarcon, iniciaram um estudo com o objectivo de confrontar o comportamento térmico de uma fachada ventilada isolada termicamente com uma fachada convencional (o edifício era um pilar e uma viga de betão armado com buracos preenchidas com tijolos cerâmicos), nas estações de Verão e de Inverno. Para a realização do estudo construíram um edifício em Tijucas (Brasil), 600x200x300cm, usando tijolo cerâmicos revestidos com *pay-molded slab* e coberto com telhas de fibrocimento. A fachada ventilada, com revestimento de placas de porcelanato, e de dimensões 269.5x269.5cm, foi colocada sobre o edifício formando uma caixa-de-ar com 17.5cm de largura, de acordo com a norma brasileira CE: O2:135.O7-OO3: Parte 2.

Para a obtenção dos valores de temperatura e do fluxo de calor da fachada, recorreram a sensores colocados em ambas as fachadas, vários sensores (oito de temperatura e dois de fluxo de calor) como está ilustrado na Figura 2.4.

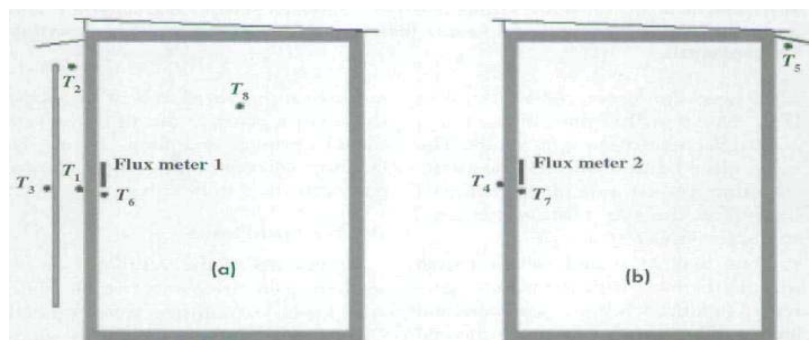


Figura 2.4 Corte vertical da secção do edifício que mostra a localização dos sensores de temperatura e dos medidores de fluxo na (a) fachada ventilada (b) fachada convencional [24].

Na estação de verão houve uma grande diferença entre as duas temperaturas das superfícies exteriores (T_3 e T_4) e a temperatura exterior (T_5). A fachada convencional apresentou fluxos de calor superiores, isto devido ao facto de o mecanismo de condução ocorrer, maioritariamente, entre as várias camadas do material. Já no caso das fachadas ventiladas, o mecanismo de convecção ocorre entre o revestimento exterior e a caixa-de-ar, e deste para a parede externa do edifício, permitindo que grande parte do calor seja dissipado.

Na estação de Inverno os resultados mostraram que na fachada ventilada os ganhos de calor (aquecimento) foram insignificantes relativamente aos da fachada convencional, isto considerando que os ganhos internos eram os desejados durante o Inverno. Para esta estação os autores surgiram com uma ideia alternativa de forma a aumentar os

ganhos térmicos da fachada ventilada. Esta sugestão consiste basicamente em fechar as entradas superiores e inferiores da caixa-de-ar de maneira a que não ocorra ventilação [24].

Segundo Naboni (2007) as fachadas ventiladas são uma solução com elevado potencial para melhorar o desempenho térmico de edifícios na Europa. De acordo com a Directiva Europeia 2002/91/EC [25] deverá ser feita uma avaliação e certificação do desempenho energético dos edifícios, de forma a promover uma majoração do mesmo. As fachadas ventiladas são um sistema que permite melhorar o desempenho térmico do edifício. Na opinião do autor, as fachadas só deverão ser implementadas e projectadas em edifícios novos, após a sua avaliação e certificação. No entanto o autor explica a dificuldade que existe em avaliar e certificar o desempenho térmico de uma fachada ventilada devido à escassez de software e de dados capazes de avaliar o comportamento e o desempenho térmico.

O desempenho da fachada exterior e consequentemente os consumos energéticos do edifício dependem de muitos factores tais como:

- clima e factores climatéricos;
- ambiente envolvente;
- forma do edifício;
- material do edifício;
- sistema de AVAC e o equipamento mecânico;
- ganhos internos;
- estratégias operacionais.

Todos estes factores interagem e determinam o fluxo de energia.

Para calcular o desempenho térmico da fachada, Naboni utilizou o modelo desenvolvido por Brent Griffith [23] para o programa *EnergyPlus*.

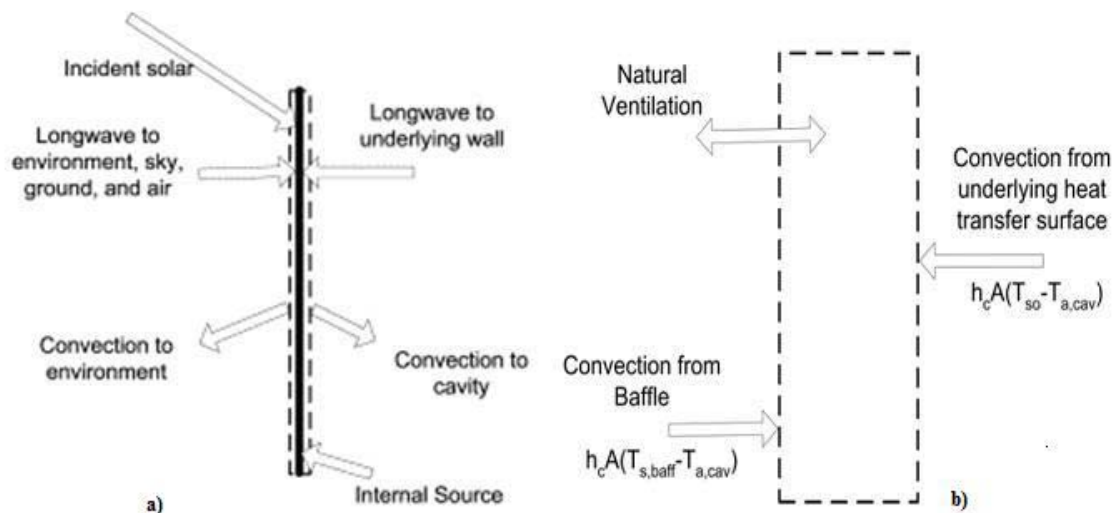


Figura 2.5 Balanço térmico do deflector (a) e da cavidade (b) [23].

Como se pode verificar pela Figura 2.5, e como já foi referido anteriormente, o modelo separa o balanço térmico do deflector e da cavidade. Estes são usados para determinar as condições limite e para modelar a transferência de calor em camada maciças.

Existem vários factores que o modelo tem em consideração:

- difusão e radiação directa;
- intensidade do vento;
- altura e geometria da fachada ventilada;
- superfícies inclinadas;
- geometria aberta ou fechada;
- densidade e obstruções da cavidade;
- absorvidade e emissividade do deflector.

Naboni analisou o desempenho térmico de uma fachada opaca, utilizando o programa EnergyPlus devido à simulação ser dependente do tempo. Com este estudo o autor pretendia responder as seguintes perguntas:

1. Qual é a performance/eficiência energética de uma fachada ventilada quando comparada com uma parede não ventilada?
2. Como funciona a fachada ventilada em diferentes climas italianos (Roma, Milão e Palermo)?
3. Uma válvula de fecho sazonal (*seasonal cavity closure*) poderá melhorar o desempenho no Inverno?

Para responder às perguntas anteriores o autor simulou um edifício residencial virtual com diferentes fachadas. A primeira simulação contemplava apenas uma parede isolada com uma significativa capacidade térmica específica, a segunda uma parede anterior com fachada ventilada e por último uma fachada ventilada com uma válvula de fecho sazonal.

Analisando os resultados, deste estudo de caso o investigador verificou que as fachadas ventiladas tendem a aumentar a poupança de energia. Estas poupanças registam-se principalmente durante, a estação aquecimento enquanto que na estação arrefecimento apenas se verifica uma diminuição no aquecimento quando se aplica a válvula de fecho sazonal. A cidade onde se registou uma diminuição superior foi no edifício situado em Milão.

As conclusões da simulação utilizando o programa *EnergyPlus* apontam no sentido de que a fachada ventilada actua como um amortecedor térmico. O autor salienta que a fachada ventilada é uma solução eficiente, para casos específicos, pois aumenta a eficiência energética de edifícios residenciais.

Naboni propõe a realização de novas investigações, no sentido de perceber de que forma diferentes materiais e configurações geométricas afectam a performance térmica, bem como devem também ser estudados outros tipos de edifícios [26].

25

2.6 Conclusão

De uma forma geral todos os estudos evidenciam que se devem realizar mais estudos sobre este tipo de fachadas, e que o seu desempenho está dependente de uma série de factores, tais como: a geometria da cavidade, o clima exterior, o material utilizado, a localização do isolamento, a radiação solar, entre outros.

Vários estudos, como os de Griffith e Balocco [16,26], evidenciam a existência de limitações durante a estação de aquecimento, aconselhando muitas vezes encerrar a caixa-de-ar da fachada ventilada. Tendo em conta este problema devem realizar-se novos estudos e procurar novas soluções com vista a melhorar o sistema. Uma das soluções consiste em avaliar a possibilidade de utilizar o calor gerado de forma passiva.

Devido ao elevado potencial deste tipo de fachadas e aos novos desenvolvimentos propostos por Naboni, é pertinente a realização de novos estudos de maneira a perceber qual o potencial das fachadas ventiladas em Portugal e então, propor regras de dimensionamento e apresentar soluções construtivas.

CAPÍTULO 3

MODELO MATEMÁTICO

No presente capítulo pretende-se descrever o modelo matemático desenvolvido por Brent Griffton. Apresenta-se ainda o programa utilizado na simulação. Esta abordagem irá sustentar a obtenção e interpretação dos resultados obtidos.

3.1 Introdução

27

A recente legislação e as preocupações relativas à optimização energética de edifícios, obriga os projectistas a identificar as condições térmicas ideais, de forma a realizar uma análise correcta e, ao mesmo tempo, compreender a influência das diferentes tipologias dos edifícios na obtenção dessas condições. Desta forma, a utilização das ferramentas de simulação de transferência de calor em edifícios é cada vez mais importante, pois permite prever e avaliar o comportamento térmico e o conforto térmico dos edifícios.

Na fase inicial do trabalho de um projectista, para uma maior eficiência na concepção de um edifício, é da maior importância realizar uma antecipação do comportamento térmico de um edifício através de uma simulação. As simulações são normalmente efectuadas para um ano típico do clima local, revelando-se muitas vezes fundamentais na tomada de decisões do projecto. O processo de simulação é o método que menos erros envolve, e o que apresenta um resultado mais preciso.

3.1.1 Software utilizado

A crise energética surgida no ano de 1970 nos Estados Unidos, levou ao aparecimento de uma ferramenta de simulação de energia e de carga térmica, o *EnergyPlus*, que tem as suas raízes em dois programas: *BLAST* e *DOE – 2*.

O *EnergyPlus*, com base na descrição do edifício e de outros parâmetros introduzidos pelo utilizador, calcula as cargas térmicas de aquecimento e de arrefecimento necessárias para manter o conforto térmico no interior do edifício, a energia consumida pelos equipamentos responsáveis por manter o conforto térmico, bem como outros parâmetros necessários para a análise térmica do edifício. Para a realização dos cálculos, o *EnergyPlus* utiliza o conceito de zonas, definidas normalmente como uma região do edifício, ou um conjunto de salas submetidas ao mesmo controlo térmico. As zonas podem interagir termicamente umas com as outras.

Em relação a outras ferramentas disponíveis, o *EnergyPlus* destaca-se pelo rigor na modelação da geometria do edifício (incluindo edifícios adjacentes), sistemas de AVAC, e pela integração de modelos que facilitam os estudos de optimização energética (iluminação natural e artificial com *dimmers*, sistemas de ventilação natural e híbrida, superfícies radiantes, painéis solares, fachadas ventiladas, etc.).

O *EnergyPlus* é um programa de simulação com carácter científico, pelo que na sua concepção não existiu preocupação em desenvolver a interface, sendo que os seus dados de entrada e saída são simplesmente textos em ASCII. Assim, o programa não apresenta uma interface *user-friendly*, mas existem outros que foram criados posteriormente a este e que apresentam uma interface mais acessível como o *DesignBuilder* (DesignBuilder Software Ltd - Reino Unido), *EFEN* (DesignBuilder Software Ltd - Reino Unido), *EplusInterface* (Bentley Systems - Reino Unido), *TREATPlus* (Performance Systems development - Nova Iorque), entre outros. Face ao exposto, optou-se por utilizar a interface *DesignBuilder* por ser uma referência no sector da simulação e o mais utilizado pelos projectistas.

O *DesignBuilder* foi a primeira interface exaustiva que surgiu para o *EnergyPlus* e permite uma rápida e fácil introdução de geometrias de edifícios oferecendo um conjunto de ferramentas que tornam mais fácil a modelação. O programa fornece dados do comportamento físico e ambiental do edifício, assim como a possibilidade da obtenção de dados concretos sobre o funcionamento do mesmo. Os resultados das simulações são apresentados sem necessidade de se recorrer a módulos externos, podendo ser efectuada a sua exportação.

3.2 Modelo Matemático

São diversos os aspectos a considerar no estudo e projecto de edifícios que apelam ao conhecimento dos fenómenos de transmissão térmica, em particular a sua envolvente, paredes, as coberturas e os pavimentos que impõem a implementação de protecção térmica indispensável à satisfação das exigências de conforto térmico, com o mínimo gasto de energia.

Para estudar ou prever o comportamento térmico dos edifícios, face a acções a que estão sujeitos, é necessário conhecer o modo de propagação do calor através dos seus elementos de construção. Esta propagação de calor assenta nas leis e princípios básicos da termodinâmica.

Admitem-se três processos distintos de transmissão de calor: a condução, a convecção e a radiação. Na maioria dos casos estes três processos coexistem, mas não inviabiliza o estudo e o tratamento analítico de cada mecanismo individualmente.

As fachadas ventiladas são um tipo de isolamento realizado pelo exterior, e têm como principal objectivo melhorar o conforto térmico no interior do edifício.

Em 2004 Griffith [23] elaborou um modelo matemático para cavidades exteriores naturalmente ventiladas, formadas por deflectores leves e colocadas no exterior da envolvente dos edifícios.

Este modelo, *The exterior Naturally vented cavity*, desenvolvido para o programa *EnergyPlus*, será adaptado neste trabalho pois permite a simulação de fachadas ventiladas.

O modelo apresentado por Griffith (Figura 3.1) é composto por uma superfície de transferência de calor subjacente e por um deflector de baixo peso. Estas duas superfícies encontram-se separadas por uma cavidade por onde circula o ar devido às diferenças de pressão e ao aquecimento do ar. A cavidade exterior actua como um deflector da radiação e da convecção, e encontra-se situada entre o ambiente exterior e a superfície exterior da superfície de transferência de calor subjacente.

O modelo assume que a capacidade térmica do deflector pode ser desprezada, uma vez que assume um valor muito inferior quando comparado com a massa da superfície de transferência de calor subjacente.

3.2.1 Balanço Energético Utilizado pelo programa EnergyPlus

De forma a simplificar o estudo, o modelo apresentado é dividido em dois balanços energéticos, no deflector e na cavidade.

Todos os balanços energéticos foram efectuados com base nos princípios básicos da termodinâmica e nos três princípios distintos da transmissão de calor, a condução, radiação e convecção.

3.2.1.1 Balanço energético ao deflector

De forma a simplificar o modelo, assume-se que o deflector é fino e com uma elevada condutibilidade, permitindo ser modelado com uma só temperatura (para ambos os lados). Formulando o balanço energético no volume de controlo é possível calcular a temperatura no deflector.

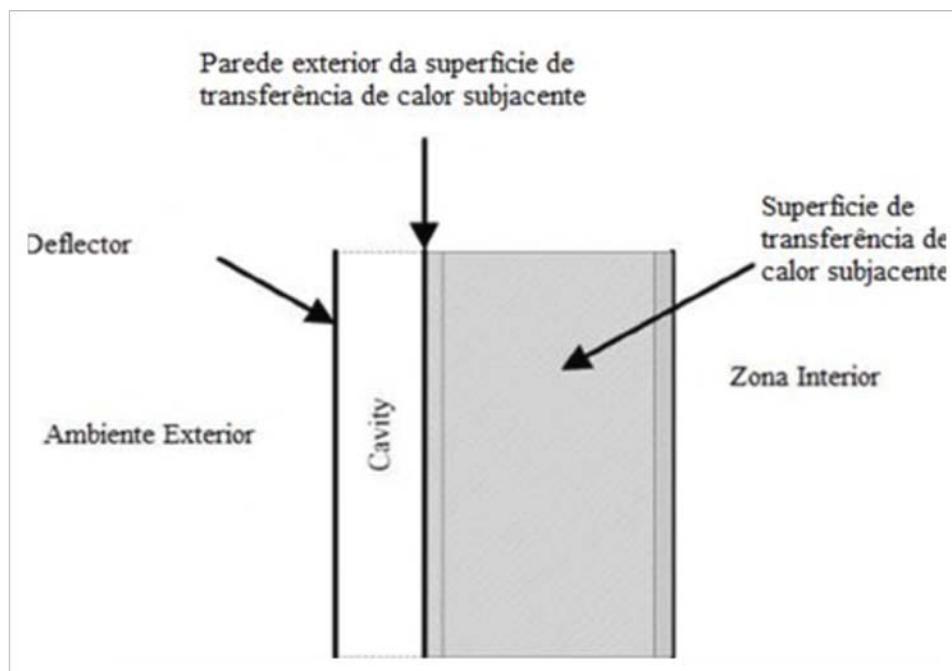


Figura 3.1 Modelo proposto por Griffith para cavidades naturalmente ventiladas [24].

Analisando a Figura 3.2 verifica-se que o balanço energético ao deflector é apenas composto por dois processos termodinâmicos, a convecção e a radiação. Não ocorre condução pelo facto de se assumir que o deflector pode ser modelado com uma só temperatura ao longo da sua superfície.

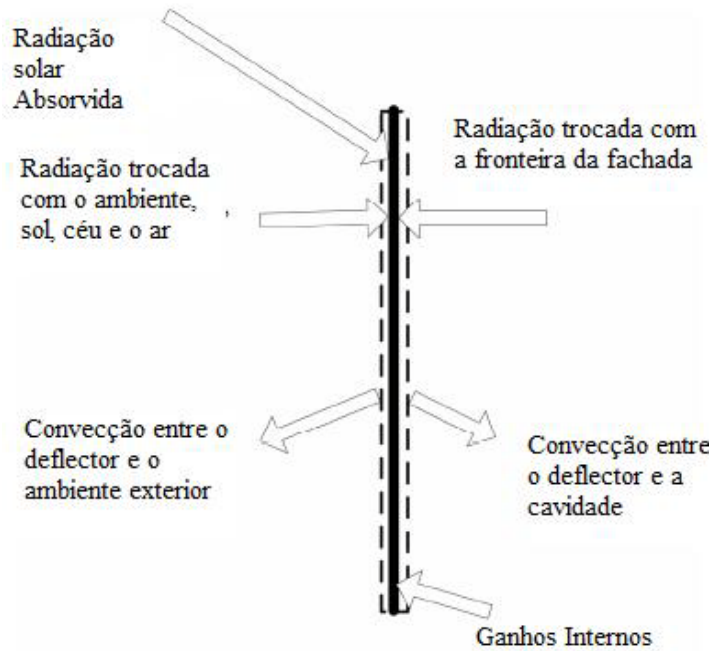


Figura 3.2 Balanço térmico no deflector [24].

No deflector existem duas formas de transmissão de calor por convecção. A primeira ocorre entre o deflector e o ambiente externo, e a segunda entre o deflector e a cavidade, e podendo ser descritas pelas equações respectivamente,

$$q''_{conv,amb} = h_{co} (T_{amb} - T_{s,baf}) \quad (3.1)$$

$$q''_{Conv,cav} = h_{c,cav} (T_{a,cav} - T_{s,baf}) \quad (3.2)$$

Onde, $q''_{conv,amb}$ é o fluxo de calor por convecção entre o deflector e o ambiente exterior; e $q''_{Conv,cav}$ o fluxo de calor por convecção entre o deflector e a cavidade.

No deflector ocorrem ainda três tipos de transferências de calor por radiação, o fluxo de calor por radiação absorvida e difusa, o fluxo de calor por radiação entre o deflector, o

ar e o ambiente envolvente e, por último, o fluxo de calor por radiação entre o deflector e a cavidade.

Estas parcelas são descritas pelas equações:

$$q''_{\alpha sol} = I_s \times \alpha \quad (3.3)$$

$$q''_{LWR,amb} = h_{r,sol}(T_{amb} - T_{s,baf}) + h_{r,amb}(T_{amb} - T_{s,baf}) + h_{r,céu}(T_{céu} - T_{s,baf}) \quad (3.4)$$

$$q''_{LWR,cav} = h_{r,cav}(T_{so} + T_{s,baf}) \quad (3.5)$$

Onde, $q''_{\alpha sol}$ é o fluxo de calor por radiação directa e absorvida, $q''_{LWR,amb}$ o fluxo de calor por radiação entre o deflector, o ar e o ambiente envolvente e $q''_{LWR,cav}$ o fluxo de calor por radiação entre o deflector e a cavidade.

O fluxo de calor por radiação absorvida é calculado com base nos modelos das nebulosidade, radiação solar, sombreamentos e reflexos. É influenciado pela localização, ângulo de face da superfície e inclinação, superfície de protecção, propriedades do material da superfície, condições climáticas, entre outras.

Com base nas expressões 3.3 – 3.5. e nos princípios básicos da termodinâmica, referidas anteriormente, verificamos que o balanço energético ao deflector é dado pela seguinte expressão:

$$q''_{\alpha sol} + q''_{conv,amb} + q''_{conv,cav} + q''_{LWR,amb} + q''_{LWR,cav} + q''_{internos} = 0 \quad (3.6)$$

Com base na expressão anterior é possível obter a expressão que permite calcular a temperatura no deflector, da forma:

$$T_{s,baf} = \frac{I_s \alpha + h_{co} T_{amb} + h_{r,atm} T_{amb} + h_{r,céu} T_{céu} + h_{r,sol} T_{amb} + h_{r,cav} T_{so} + h_{c,cav} T_{a,cav}}{h_{co} + h_{c,cav} + h_{r,ar} + h_{r,sol} + h_{cav} + h_{c,cav}} \quad (3.7)$$

3.2.1.2 Balanço energético à cavidade

A cavidade é o volume de ar localizado entre o deflector e a superfície de transferência de calor subjacente. O ar no interior da cavidade está uniformemente distribuído. Mais uma vez, formulando o balanço energético ao volume de controlo (Figura 3.3), é possível calcular a temperatura uniforme do ar no interior da cavidade.

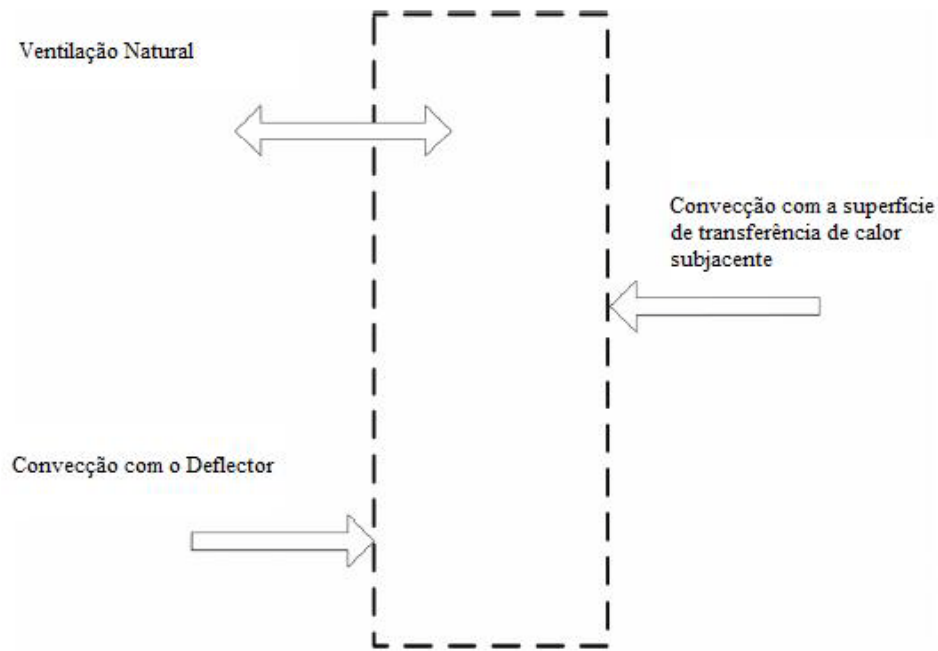


Figura 3.3 Balanço térmico na cavidade

Analisando a figura 3.3, verificamos que o balanço energético à cavidade é apenas composto por um processo termodinâmico, a convecção. Verificámos também que ocorre ventilação natural.

As equações da convecção na cavidade são obtidas pelas expressões:

$$\dot{Q}_{co} = h_{c,cav} A(T_{a,cav} - T_{so}) \quad (3.8)$$

$$\dot{Q}_{c,baff} = h_{c,cav} A(T_{a,cav} - T_{s,baff}) \quad (3.9)$$

Onde, \dot{Q}_{co} é taxa de transferência de calor por convecção com a superfície de transferência de calor adjacente e $\dot{Q}_{c,baff}$ é a taxa de transferência de calor por convecção entre a cavidade e o deflector.

A outra contribuição no balanço energético à cavidade é a ventilação natural que ocorre entre a cavidade e o ambiente exterior. Modelar a ventilação natural não é fácil, mas existem modelos que foram desenvolvidos de forma a simplificar o modelo. Esses modelos resultam da junção das forças do vento com as fronteiras naturais.

A ventilação natural é obtida pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{vent} = \dot{m}v_{vent} c_p (T_{a,cav} - T_{amb}) \quad (3.10)$$

Onde, \dot{Q}_{vent} representa a taxa de transferência de calor por ventilação natural, ou seja, a troca de ar entre o exterior e a cavidade;

O Caudal mássico correspondente à ventilação natural associado pode ser calculado com base na seguinte expressão:

$$\dot{m}_{vent} = \rho \dot{V}_{tot} \quad (3.11)$$

O caudal volúmico de ar ventilado \dot{V}_{tot} , na cavidade é dado pela seguinte expressão,

$$\dot{V}_{tot} = \dot{V}_{vento} + \dot{V}_{térmico} \quad (3.12)$$

Onde, \dot{V}_{vento} representa o caudal volúmico devido as forças do vento; $\dot{V}_{térmico}$ é o caudal volúmico devido ao efeito da pluma térmicaⁱⁱ.

O caudal volúmico devido a forças do vento pode ser obtido pela expressão:

$$\dot{V}_{vento} = C_v A_{in} U_{\infty} \quad (3.13)$$

Onde, C_v representa a eficiência das aberturas, sendo dependente da geometria da abertura e da orientação relativamente ao vento e A_{in} é a área dessas aberturas.

ⁱⁱ Corrente de ar ascendente devido a efeitos de diferença de densidades

A área das aberturas pode ser calculada como metade da área total da fachada e é dada pela seguinte expressão:

$$A_{in} = \frac{A}{2} \quad (3.14)$$

O caudal volúmico devido à pluma térmica depende do gradiente de temperaturas e é dado pelas seguintes expressões:

$$\dot{V}_{térmico} = C_D A_{in} \sqrt{\frac{2g\Delta H_{NPL}(T_{a,cav} - T_{amb})}{T_{a,cav}}} \quad , \text{se } (T_{a,cav} > T_{amb}) \quad (3.15)$$

$$\dot{V}_{térmico} = C_D A_{in} \sqrt{\frac{2g\Delta H_{NPL}(T_{amb} - T_{a,cav})}{T_{amb}}} \quad , \text{se } (T_{amb} > T_{a,cav}). \quad (3.16)$$

Onde, C_D representa o coeficiente de descarga da abertura e depende da geometria da abertura e ΔH_{NPL} representa a altura padrão. A altura padrão representa o ponto médio onde se verifica uma pressão neutra.

Com base nos princípios da termodinâmica, o balanço energético ao deflector é dado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{co} + \dot{Q}_{c,baff} = 0 \quad (3.17)$$

Com base no balanço térmico e nas respectivas potências podemos calcular a temperatura no interior da cavidade, que é dada pela Equação:

$$T_{a,cav} = \frac{h_{c,cav} AT_{so} + \dot{m}_{vent} c_p T_{amb} + h_{c,cav} AT_{s,baff}}{h_{c,cav} A + \dot{m}_{vent} c_p + h_{c,cav} A} \quad (3.18)$$

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se a metodologia utilizada na simulação. Apresenta-se o edifício em estudo, bem como todas as características necessárias à sua simulação.

4.1 Procedimento e metodologia da simulação

37

A simulação de um edifício reproduz um caso real através de um modelo que avalia o comportamento térmico quando submetido a diferentes condições, tais como factores ambientais, características dos materiais da envolvente do edifício, taxa de ocupação, iluminação, equipamentos e outros. A utilização de simulações computacionais é hoje cada vez mais frequente, devido à facilidade na manipulação dessas variáveis e ao tempo de processamento dos dados.

Recorrendo a técnicas de simulação é possível fazer uma antevisão do comportamento térmico do edifício, quando este ainda se encontra em fase de projecto. Assim, é possível prever qual a melhor configuração do edifício, qual a melhor localização, e no caso concreto do presente estudo, verificar qual a melhor configuração da fachada ventilada.

O comportamento térmico de uma fachada ventilada varia quando submetido a diferentes condições, de tal forma que é necessário prever o seu comportamento nas diferentes regiões climáticas do país. Foram realizadas simulações para três cidades diferentes, que apresentam climas distintos, de forma a caracterizar o comportamento da fachada ventilada no clima português. As três cidades escolhidas foram: Bragança, como característica de um clima continental frio; Évora, como característica de um clima continental quente, e por último Ovar, como característica de um clima temperado de influência marítima.

Caracterizou-se para cada cidade as respectivas estações climáticas ao longo de um ano com base no RCCTE. Ou seja, com base nos dados fornecidos pelo quadro III.1 do RCCTE [27], dividiram-se as diferentes estações do ano para cada cidade, de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Divisão das diferentes estações do ano para as diferentes cidades.

| | Inverno | Verão | Primavera | Outono |
|-----------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|
| Ovar | 6 Meses (de Novembro a Abril) | 4 Meses (de Junho a Julho) | 1 Mês (Maio) | 1 Mês (Outubro) |
| Évora | 6 Meses (de Novembro a Abril) | 4 Meses (de Junho a Julho) | 1 Meses (de Abril a Maio) | 1 Mês (Outubro) |
| Bragança | 8 Meses (de Outubro a Maio) | 4 Meses (de Junho a Julho) | - | - |

38

Depois de várias simulações realizadas, e com base nas possíveis saídas de resultados permitidos pelo *EnergyPlus*, percebeu-se que o melhor método de análise de uma fachada ventilada no estudo do comportamento térmico de um edifício seria o cálculo dos Grau.Dia ganhos ($G.D_{\text{ganhos}}$) do edifício.

A colocação de uma fachada ventilada (deflector) no edifício leva a que se crie um microclima na caixa-de-ar. De modo a perceber como é que a colocação da fachada ventilada influencia o comportamento térmico e o microclima do edifício, criámos então o conceito de $G.D_{\text{ganhos}}$. Os $G.D_{\text{ganhos}}$ representam ganhos do edifício na utilização de fachadas ventiladas, ou seja, a utilização de fachadas ventiladas é compensada aquando da existência de valores positivos. Os $G.D_{\text{ganhos}}$ foram calculados como um somatório dos graus dias para as diferentes estações do ano com base na expressão 4.1,

$$GD_{\text{Ganhos}} = \sum GD_{\text{Estação}} \quad (4.1)$$

Onde o Grau.Dia de cada estação foi calculado como uma diferença entre as temperaturas da superfície de transferência de calor subjacente, quando o edifício não apresentava fachada ventilada e quando o edifício apresentava fachada ventilada. Essas diferenças de temperatura foram somadas ao longo de um dia e dividida por 24 horas de forma a obter o Grau.Dia para a respectiva estação.

O Graus.Dias foi calculado a partir da equação 4.2 para as respectivas estações.

$$G.D = \lambda \cdot \frac{T_{sfv} - T_{cfv}}{24} \quad (4.2)$$

Onde, $\lambda = 1$ para os meses de Primavera e Verão e $\lambda = -1$ para os meses de Inverno e Outono, T_{sfv} a temperatura da superfície da parede exterior do edifício sem fachadas ventiladas e T_{cfv} a temperatura da superfície da parede exterior do edifício com fachadas ventiladas.

Depois de calculados os valores dos Grau Dia Totais para as diferentes estações, estes valores foram comparados com as necessidades de aquecimento e arrefecimento.

Todas as simulações foram realizadas no software *EnergyPlus*, onde se obtiveram as diferentes temperaturas, bem como as respectivas necessidades de aquecimento e de arrefecimento.

Devido ao facto de nem todos modelos e/ou saída de resultados do *EnergyPlus* estarem disponíveis na interface *DesignBuilder*, e de este não possibilitar a simulação de fachadas ventiladas, a simulação do edifício foi realizada através da utilização de dois programas. Para se proceder à simulação das fachadas ventiladas, o edifício foi modelado em *DesignBuilder*, e posteriormente exportado para o *EnergyPlus*, onde foi implementando o modelo desejado.

No *DesignBuilder* foram definidas todas as características do edifício: actividades, geometria, tipo construção, aberturas, iluminação e sistema AVAC. Posteriormente, exportou-se toda esta informação para o *EnergyPlus*, num ficheiro com uma extensão IDF (Input data file). O ficheiro IDF é um ficheiro ASCII contendo toda a informação do edifício.

O ficheiro com extensão IDF foi editado no programa *EnergyPlus* usando o programa IDFEditor, de forma a adicionar dois novos objectos denominados *Exterior Natural Vented Cavity* e *Other Side Conditions Model*. Esses dois objectos foram editados de forma a introduzir uma fachada ventilada no edifício pretendido. Neste objecto é possível introduzir uma série de parâmetros que influenciam o comportamento do edifício, tal como se pode observar na Figura 4.1.

| Field | Units |
|---|---------------|
| Name | |
| OtherSideConditionsModel Object Name | |
| Area Fraction of Openings | dimensionless |
| Thermal Emissivity of Exterior Baffle Material | dimensionless |
| Solar Absorptivity of Exterior Baffle | dimensionless |
| Height scale for bouyancy-driven ventilation | |
| Effective Thickness of Cavity Behind Exterior Baffle | m |
| Ratio of Actual surface area to projected surface area | dimensionless |
| Roughness of Exterior Surface | |
| Cv, Effectiveness for perforations with respect to Wind | dimensionless |
| Cd, Discharge Coefficient for Openings with respect to bouyancy-driven flow | dimensionless |
| Surface Name #1 | |
| Surface Name #2 | |
| Surface Name #3 | |

Figura 4.4.1 Parâmetros do objecto *Exterior Natural Vented Cavity*.

A simulação do edifício foi previamente realizada sem fachada ventilada, tendo-se calculado a energia necessária para o aquecimento e o arrefecimento e respectivas temperaturas, de forma a manter o edifício na temperatura de conforto (20°C na estação de aquecimento e 25°C na estação de arrefecimento).

De seguida, foram introduzidos dois novos objectos no edifício, onde se variaram os diferentes parâmetros: fracção da área das aberturas, emissividade térmica do material, absorptividade solar do deflector, espessura efectiva da cavidade, rugosidade da superfície, eficiência das aberturas, coeficiente de descarga das aberturas, razão entre a área actual da superfície e a área da superfície projectada, e a altura padrão de acordo com a Tabela 3.2.

Existem vários parâmetros que não variaram ao longo das simulações: coeficiente de descarga, razão entre a área actual da superfície e a área da superfície projectada e altura padrão. Não fez parte do presente estudo analisar quais as consequências da variação dos mesmos no comportamento térmico do edifício. O coeficiente de descarga das aberturas é usado para determinar o caudal de ar que se desloca devido à pluma térmica, dependendo da geometria das aberturas. No presente estudo o coeficiente de descarga apresentou sempre o valor de 0.65, pois é um valor recomendado pela ASHRAE Handbook [28]. A razão entre a área actual da superfície e a área da superfície projectada apresentou sempre o valor 1, pois no presente estudo e ao longo das várias simulações, a fachada ventilada encontrou-se sempre na vertical. A altura padrão, segundo Griffith [24], é sempre metade do pé direito do edifício. No estudo aqui apresentado foi considerado um valor fixo de 1.75 para o parâmetro altura padrão.

Tabela 4.1 Valores dos parâmetros utilizados nas simulações.

| | Fracção da área das Aberturas | Absortividade | Espessura efectiva da Cavidade [m] | Rugosidade | Eficiência das Aberturas |
|-------------------------|--|----------------------|---|-------------------|---|
| Simulação 1 | 0.01 | 0,25 | 0.1 | Médio Liso | 0.9 |
| Simulação 2 | 0.01 | 0.8 | 0.1 | Médio Liso | 0.9 |
| Simulação 3 | 0.01 | 0.8 | 0.1 | Médio Liso | 0.25 |
| Simulação 4 | 0.01 | 0.8 | 0.1 | Médio Liso | 1.5 |
| Simulação 5 | 0.01 | 0.8 | 0.1 | Liso | 1.5 |
| Simulação 6 | 0.01 | 0.8 | 0.1 | Muito Rugoso | 1.5 |
| Simulação 7 | 0.01 | 0.8 | 0.2 | Muito Rugoso | 1.5 |
| Simulação 8 | 0.034 | 0.8 | 0.1 | Muito Rugoso | 1.5 |
| Simulação 9 | 0.028 | 0.8 | 0.1 | Muito Rugoso | 1.5 |
| Simulação 10 | 0.022 | 0.8 | 0.1 | Muito Rugoso | 1.5 |
| Simulação 11 | 0.068 | 0.8 | 0.2 | Muito Rugoso | 1.5 |
| Simulação 12 | 0.057 | 0.8 | 0.2 | Muito Rugoso | 1.5 |
| Simulação 13 | 0.045 | 0.8 | 0.2 | Muito Rugoso | 1.5 |
| Simulação 14 | 0.01 | 0.5 | 0.1 | Médio Liso | 0.9 |

Os parâmetros Emissividade e Absortividade, são as propriedades do deflector que têm em conta a radiação do infravermelho de onda longa e a radiação solar de onda curta. O valor da emissividade apresentou sempre o valor de 0.85 e o valor da absortividade variou entre 0.25, 0.5 e 0.8. Onde 0.25 representa uma fachada pintada de cor clara, 0.5 uma fachada com uma cor intermédia e por último 0.8 uma fachada pintada de cor escura [29].

O programa utilizado permite a variação da rugosidade entre: muito liso, liso, médio liso, médio rugoso, rugoso e muito rugoso. Sendo este parâmetro uma característica do deflector, na impossibilidade de realizar um estudo para todas as opções, optou-se por utilizar o liso, médio liso e muito rugoso.

No parâmetro da espessura efectiva da cavidade utilizaram-se os valores 0.1 e 0.2, sendo esta a distância entre o deflector e a superfície de transferência de calor subjacente.

A fracção da área das aberturas é uma divisão entre a área das aberturas e a área total do deflector. De forma a perceber como a diminuição ou o aumento da área da cavidade influencia a circulação do ar na área das aberturas, utilizaram-se três valores para a altura das aberturas. Esses valores consistiram em +80%, 100% e +120% da espessura efectiva da cavidade.

Após a simulação do edifício com fachadas ventiladas os resultados obtidos foram comparados com o mesmo edifício sem fachadas ventiladas. Os resultados evidenciam o conjunto de parâmetros que permitem obter um menor consumo de energia em aquecimento e em arrefecimento.

4.2 Edifício em estudo

Numa simulação térmica de edifícios é fundamental que previamente se faça uma descrição da constituição do edifício, do meio envolvente e sua localização.

No presente estudo foi projectado um edifício no programa *DesignBuilder* (Figura 4.3) com comprimento de 26,8m e largura de 6m e um pé direito de 3,5m. A fachada 1 está orientada a Este, a fachada 2 a Norte, a 3 a Oeste e a 4 encontra-se orientada a Sul.

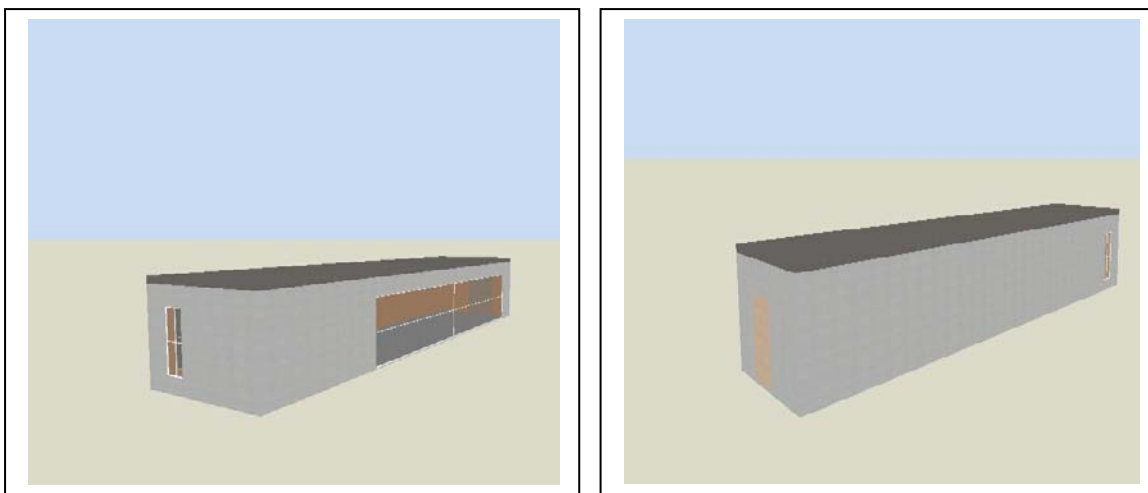


Figura 4.4.2 Perspectiva do edifício modelo.

No mesmo programa foram descritas todas as condições de fronteira, tais como ocupação, orientação, constituição do edifício, aberturas, iluminação e sistemas AVAC. Todas essas condições de fronteira encontram-se descritas no ponto seguinte.

43

4.2.1 Condições de Fronteira

De seguida são descritas todas as variáveis de entrada que foram introduzidas no programa *DesignBuilder*. Considerou-se que não existia ventilação natural nem infiltrações e ainda que o edifício não apresentava nenhum tipo de sistema AVAC.

Ocupação

Considerou-se que existiam 0.02 pessoas / m², com uma taxa metabólica de 0.9 metⁱⁱⁱ. Na situação de Inverno apresentavam um índice 1 clo^{iv}. Na situação de Verão apresentavam um índice 0.5 clo.

ⁱⁱⁱ 1MET=3.5ml.kg⁻¹.min⁻¹, representa o consumo de oxigénio requerido por um indivíduo em repouso.

^{iv} Clo- = 0,155 m² °C/W = 6.452 W/m²°C

Construção do edifício

A Tabela 4.1 representa o tipo de constituição do edifício, indicando materiais e dimensões características.

Tabela 4.2 Constituição do edifício.

| Constituição | |
|---------------------|---|
| Envolvente exterior | 150mm Betão e 60mm de Poliestireno Extrudido |
| Cobertura | 200mm de Betão, 200mm de Poliestireno Extrudido 5mm de Tela Asfáltica |
| Piso | 400mm de Betão e 10mm de material cerâmico |

Aberturas

O edifício modelo apresenta vidros duplos com 6mm de espessura e 6mm de caixa-de-ar.

Iluminação

A taxa de iluminação é de 5.10 W/m^2 (ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil).

AVAC

O edifício não apresentava sistemas de AVAC, ventilação mecânica ou ventilação natural.

Toda esta informação é reunida num ficheiro IDF que depois foi transportada para o programa *EnergyPlus*, de forma a poder ser efectuada a simulação do edifício.

Ficheiros Climáticos

O desempenho térmico de um edifício está directamente relacionado com as condicionantes externas relativas ao clima, como a temperatura do ar, a humidade, a radiação, a direcção do vento, entre outras. Ao realizar uma simulação é necessário que esta seja efectuada com base num ficheiro climático, pois desta forma o programa consegue prever de uma forma real o comportamento do edifício, quer na estação de aquecimento quer na estação de arrefecimento. Os ficheiros climáticos fornecem informações ao longo de um dia, relativas à temperatura, velocidades do vento, humidade relativa e temperatura do solo, entre outros.

A simulação de um edifício, utilizando o programa *EnergyPlus* exige a introdução de um ficheiro climático no formato EPW. O formato EPW é um ficheiro do tipo ASCII, tal como todos os outros ficheiros utilizados pelo *EnergyPlus*.

Todos os ficheiros com a excepção de Ovar encontram-se disponíveis no site do *EnergyPlus*.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo discute-se e apresenta-se os resultados obtidos, avalia-se a eficiência do sistema construtivo na melhoria do comportamento térmico de um edifício nas diferentes regiões climáticas. Avalia-se qual a melhor configuração da fachada, bem como o comportamento dos diferentes parâmetros estudados.

47

5.1 Análise da solução construtiva nas diferentes estações

Esta dissertação teve como objectivo fundamental estudar o comportamento térmico de um edifício com fachadas ventiladas. Foram efectuadas várias simulações, em diferentes regiões climáticas, com o objectivo de identificar qual o conjunto de parâmetros mais eficientes, que permitam obter um menor consumo em aquecimento e em arrefecimento.

Seguidamente, apresentam-se os resultados das simulações realizadas nas três regiões climáticas.

5.1.1 Bragança

As condições simuladas correspondem a maior eficiência em consumo de energia na estação de Inverno, como podemos observar na figura 5.1, correspondem às consideradas na simulação 3, pois é a que reúne um conjunto de parâmetros que permitem uma redução de cerca de 5% no consumo em aquecimento.

Para a estação de Verão, a simulação mais eficiente é a simulação 1, dado que permite uma redução de cerca de 45% no consumo em arrefecimento (Fig. 5.2).

No gráfico da Figura 5.3 observa-se uma redução superior na estação de arrefecimento quando comparada com a estação de aquecimento. Estes ganhos deverão ser ponderados e contextualizados, dado que o número de meses da estação de arrefecimento é muito superior aos da estação de aquecimento, justificando um consumo em arrefecimento relativamente inferior.

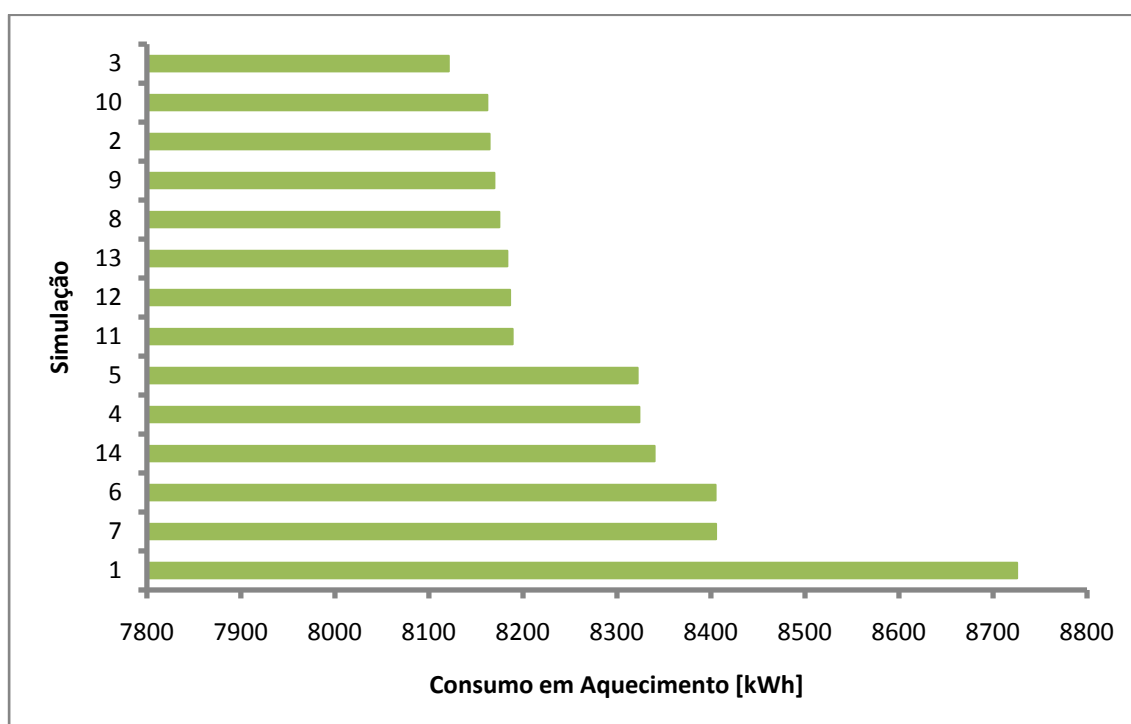


Figura 5.1 Variação do consumo na estação de Inverno para as diferentes simulações.

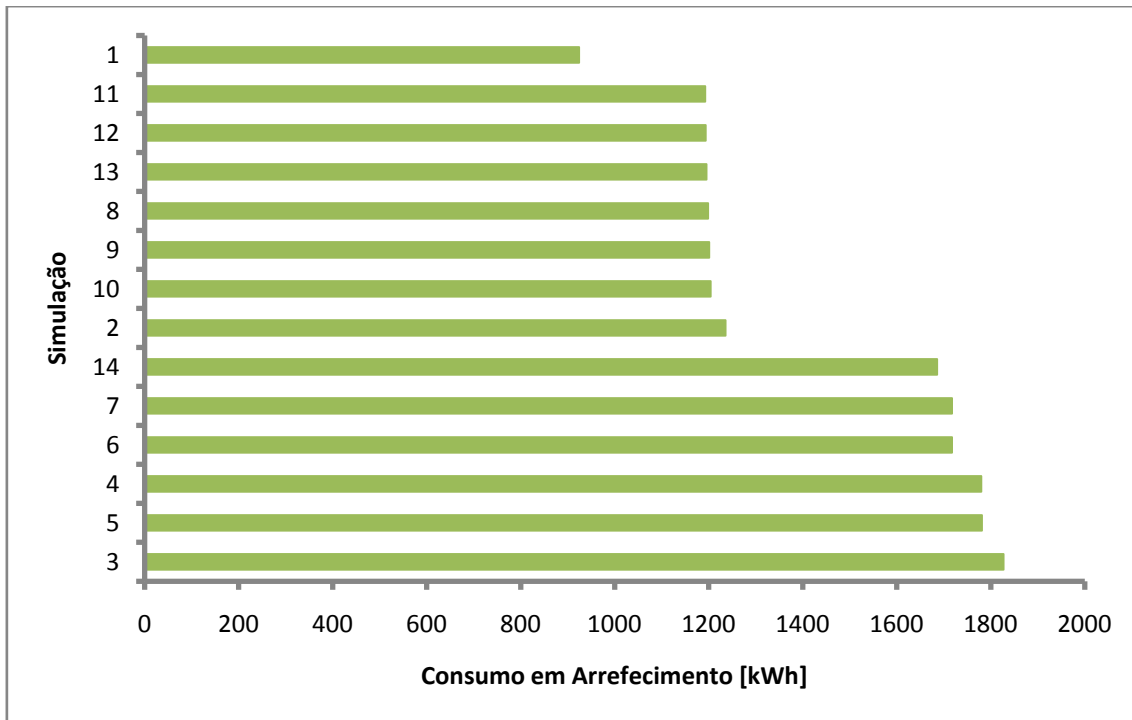


Figura 5.2 Variação do consumo na estação de Verão para as diferentes simulações.

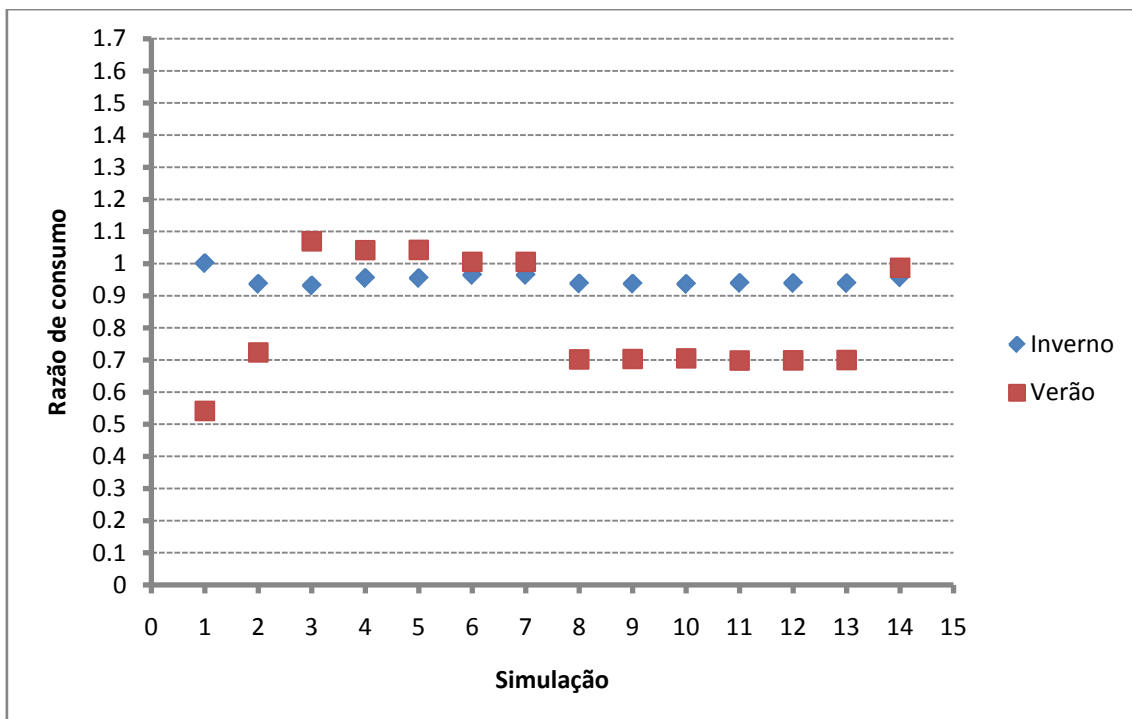


Figura 5.3 Razão de consumo entre o edifício com e sem fachada ventilada.

5.1.2 Ovar

Observando as figuras 5.4 - 5.8 verifica-se na estação de aquecimento o conjunto de parâmetros que permite reduzir um consumo em aquecimento são os reunidos na simulação 3. Para a estação de arrefecimento verifica-se que é na simulação 1 onde o consumo em arrefecimento é inferior. Analisando a Figura 5.8 verifica-se que é na estação da Primavera onde se observa uma maior redução no consumo, cerca de 60%, seguida da estação de Verão com cerca de 50%. Nas estações do Outono e do Inverno a redução situa-se também perto dos 10%.

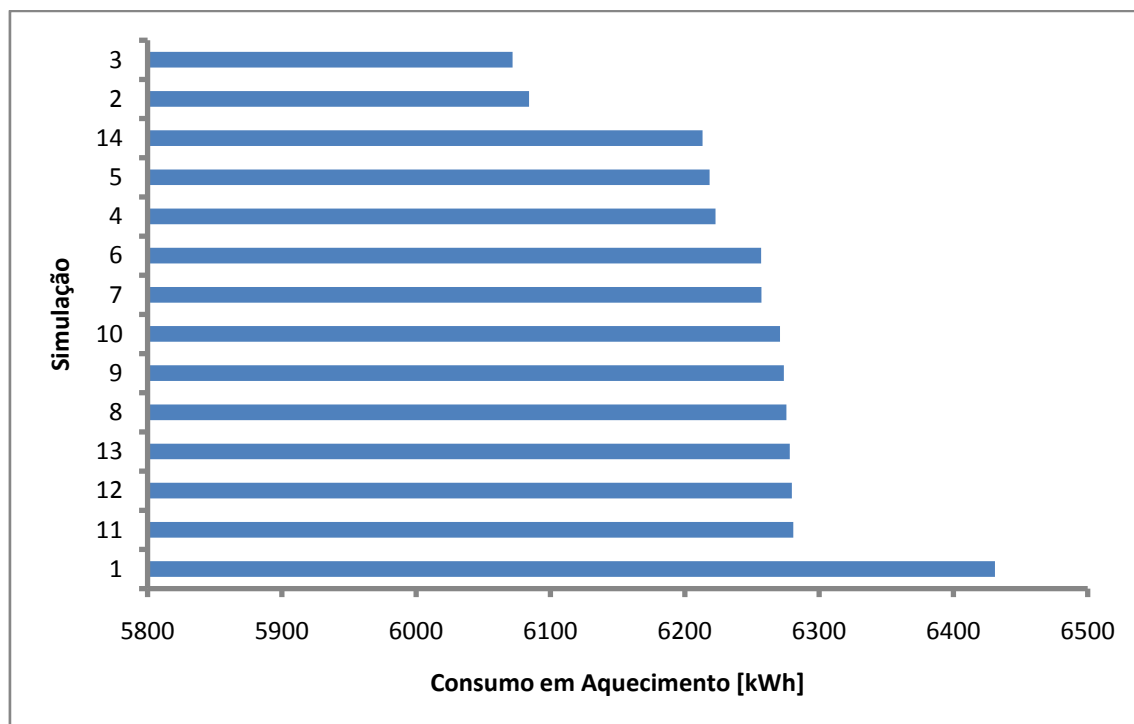


Figura 5.4 Variação do consumo na estação de Inverno para as diferentes simulações.

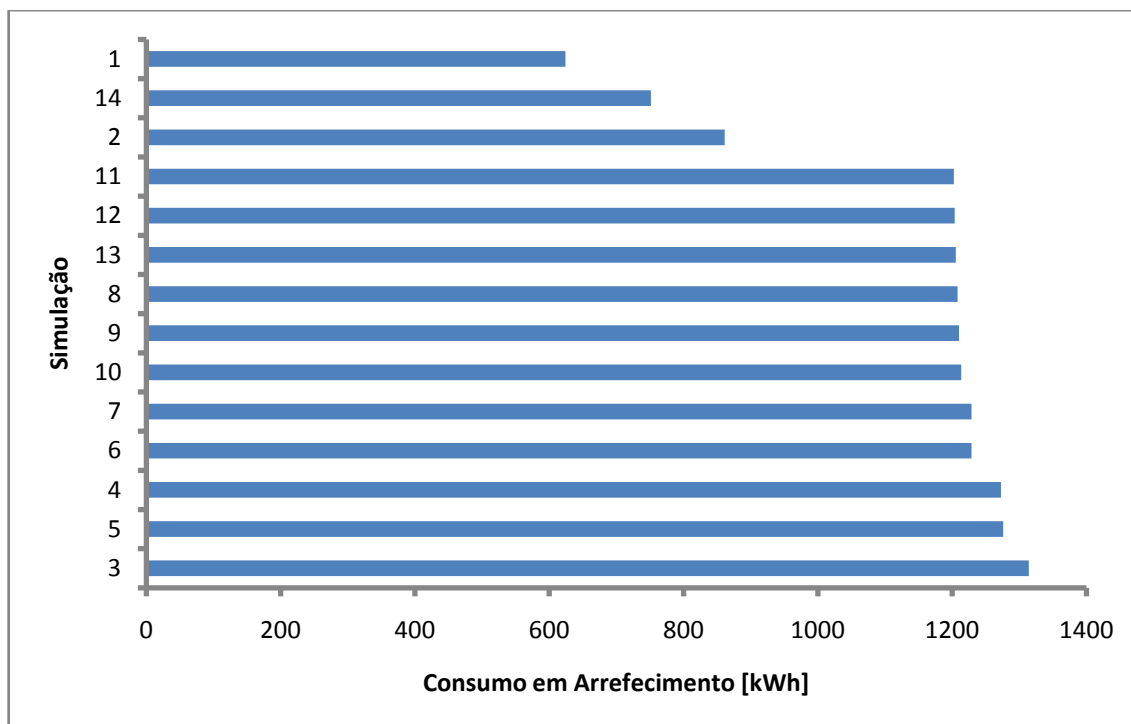


Figura 5.5 Variação do consumo na estação de Verão para as diferentes simulações.

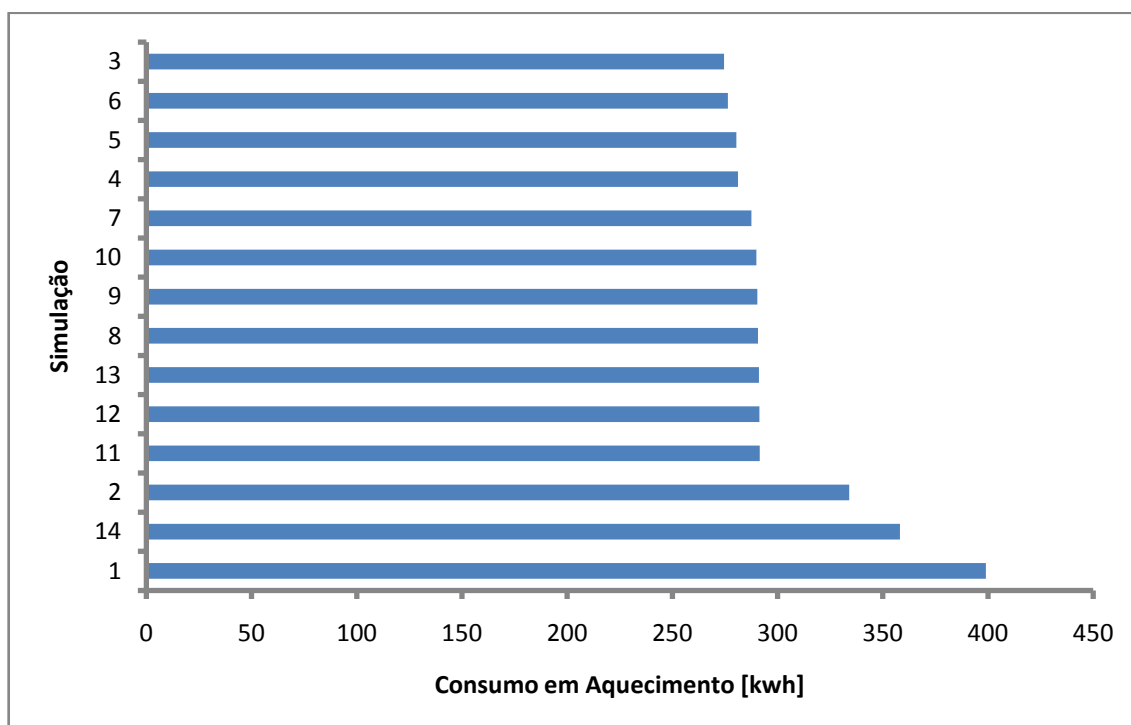


Figura 5.6 Variação do consumo na estação do Outono para as diferentes simulações.

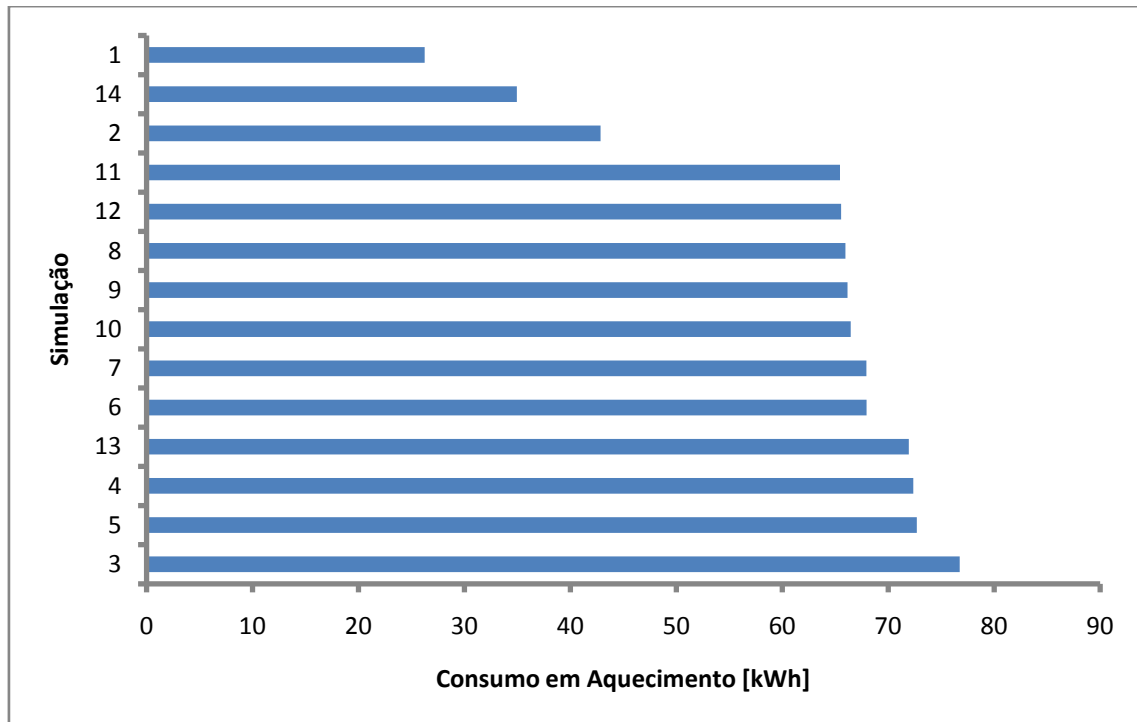


Figura 5.7 Variação do consumo na estação da Primavera para as diferentes simulações.

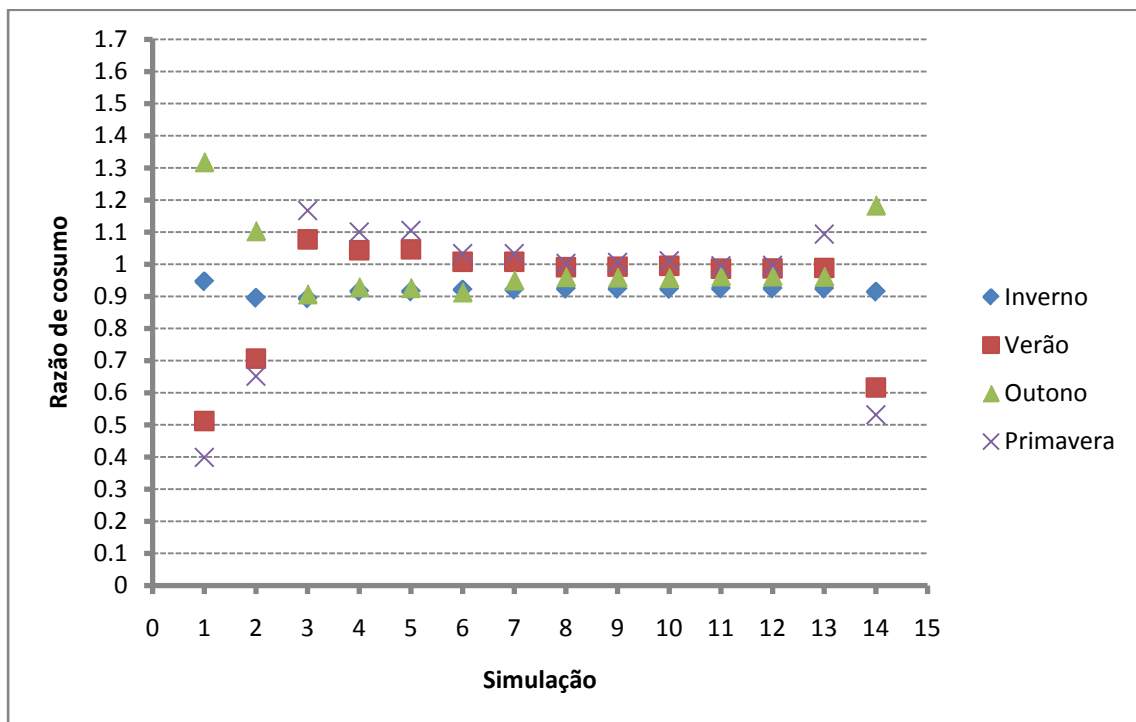


Figura 5.8 Razão de consumo entre o edifício com e sem fachada ventilada.

5.1.3 Évora

Os resultados das figuras 5.9 - 5.13 evidenciam que nas estações de arrefecimento o conjunto de parâmetro que permite diminuir o consumo em arrefecimento é a simulação 1. Por outro lado, na estação de Inverno é na simulação 3 que se verifica uma diminuição mais acentuada no consumo em aquecimento. Para o Outono, a simulação 6 é aquela que permite obter uma redução mais acentuada no consumo em aquecimento.

Na Figura 5.13 podemos constatar a redução dos gastos em cada uma das estações do ano. Na Primavera observa-se uma redução mais acentuada, cerca de 60%, seguida do Verão com uma redução de cerca de 50%, do Inverno e Outono com cerca de 5%.

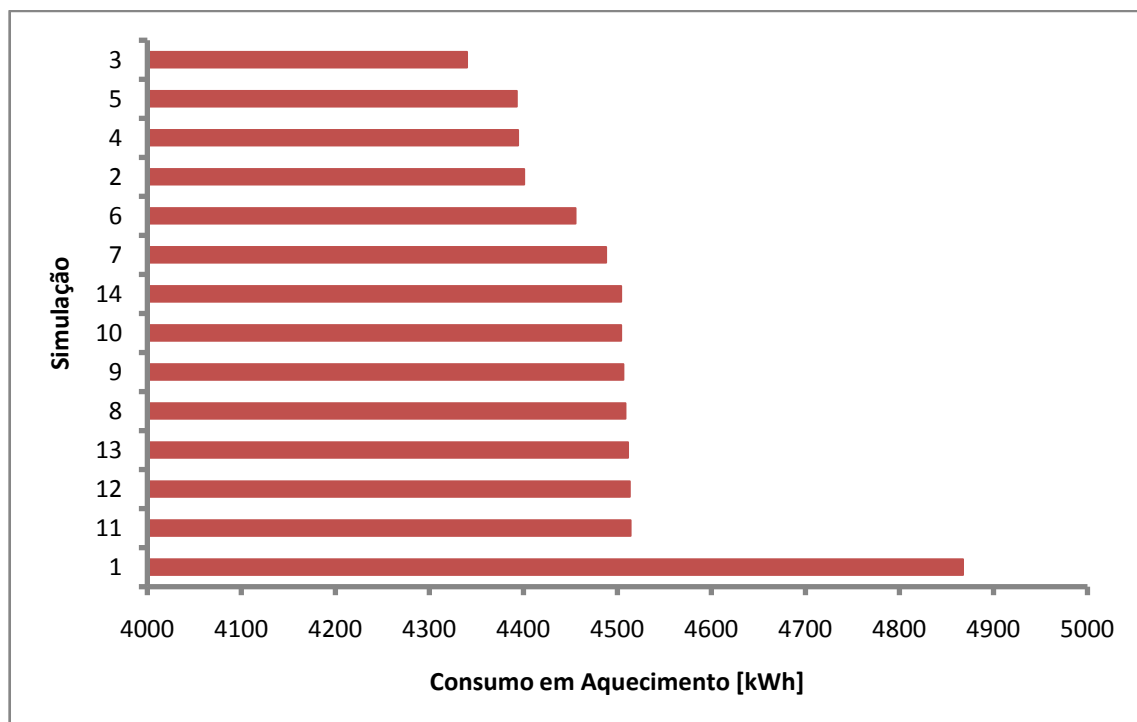


Figura 5.9 Variação do consumo na estação de Inverno para as diferentes simulações.

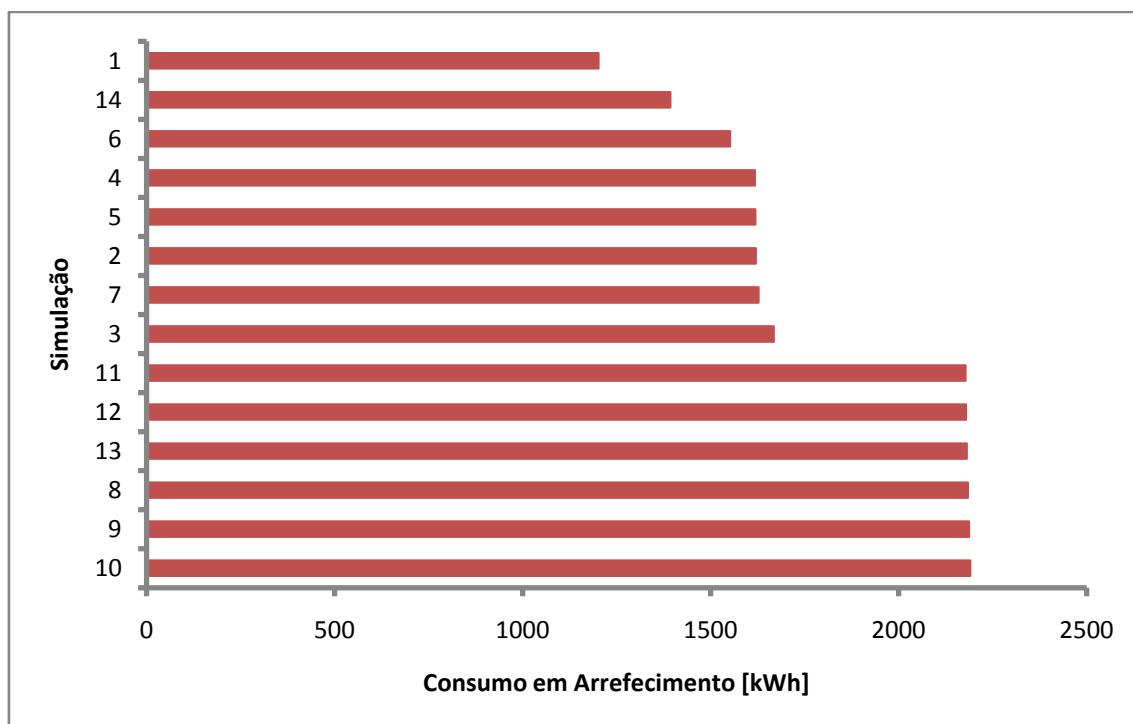


Figura 5.10 Variação do consumo na estação de Verão para as diferentes simulações.

54

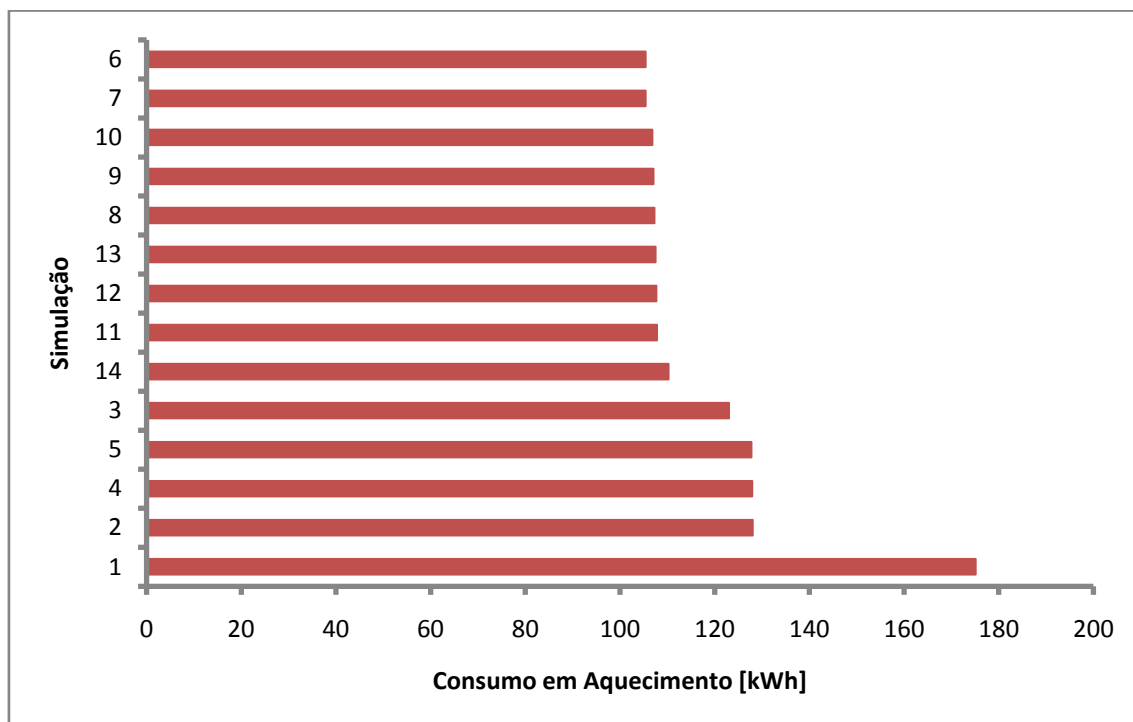


Figura 5.11 Variação do consumo na estação do Outono para as diferentes simulações.

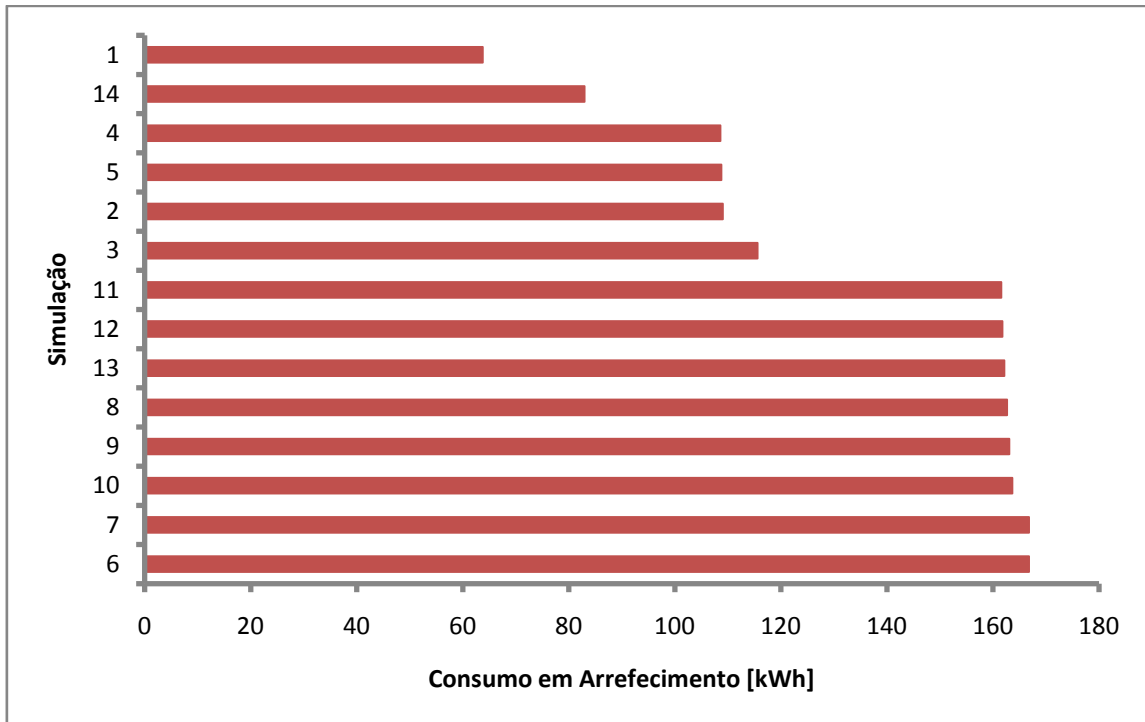


Figura 5.12 Variação do consumo na estação da Primavera para as diferentes simulações

55

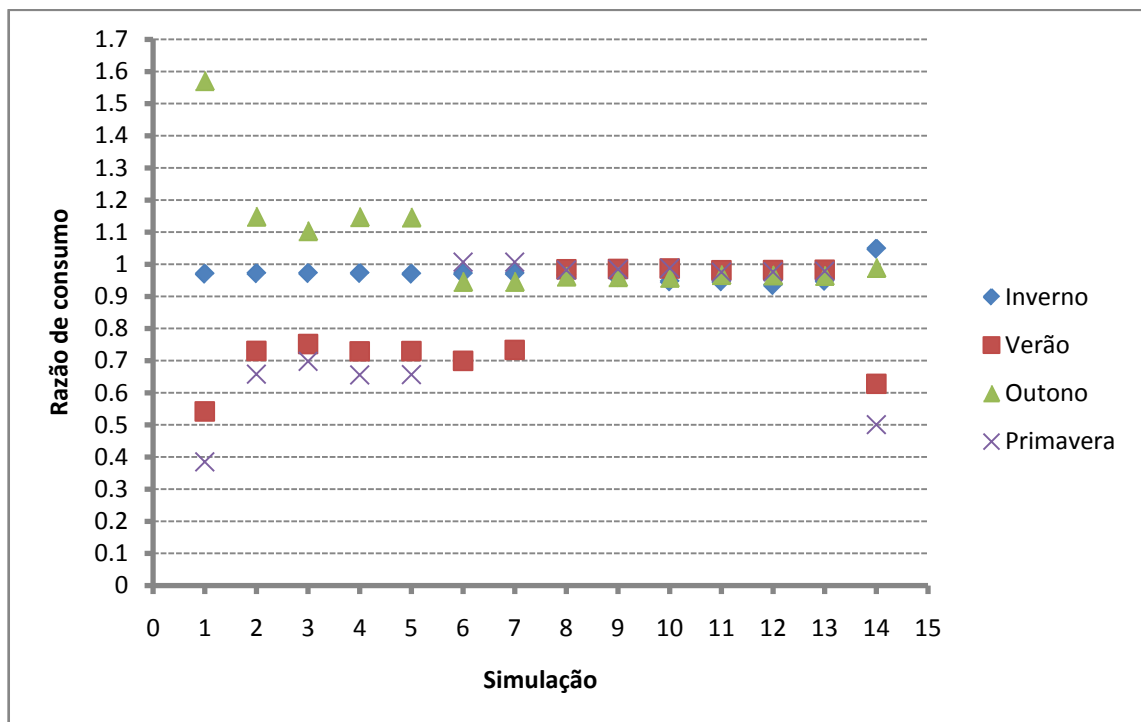


Figura 5.13 Razão de consumo entre o edifício com e sem fachada Ventilada.

5.1.4 Discussão dos Resultados

Nos parágrafos que se seguem, apresenta-se a análise dos resultados obtidos nas simulações realizadas para as três regiões climáticas, sistematizados nas figuras 5.1 - 5.13.

De uma forma geral verifica-se que existe uma redução do consumo em todas as situações. No entanto, é na estação de arrefecimento que se verifica uma redução mais acentuada, havendo mesmo casos onde essa redução atinge o valor de 60%. À semelhança dos resultados apresentados por Naboni [26] e Balocco [7], constatamos que a utilização de fachadas ventiladas diminui efectivamente o consumo em energia. No nosso estudo registamos diminuições no consumo mais acentuadas principalmente nas estações de arrefecimento, que pode ser explicado pelo facto ter sido realizado para climas diferentes.

Umas das razões que pode explicar uma diminuição acentuada no consumo em arrefecimento é o facto de o deflector funcionar como uma barreira contra os ganhos solares, originando ganhos inferiores na estação de arrefecimento. Uma outra razão poderá ser a pluma térmica, causada pelos gradientes de pressão e de temperatura, formada no interior da cavidade retirar o calor através da convecção durante as horas de maior consumo.

De uma forma geral, podemos afirmar que quando a fracção da área das aberturas apresenta um valor inferior, o consumo de energia em aquecimento é inferior, pelo que se pode inferir ser esta a melhor solução para a estação de aquecimento.

Quando analisamos os gráficos das três regiões climáticas, constatamos que o conjunto de parâmetros reunidos na simulação 3 são os que favorecem uma redução no consumo em aquecimento na estação de Inverno para três regiões climáticas. No entanto, no consumo em arrefecimento verifica-se que a simulação 1 é aquela que favorece uma redução no consumo em arrefecimento na estação de Verão.

Para as estações da Primavera e Outono verifica-se que na cidade de Ovar a simulação que favorece uma maior redução no consumo em aquecimento no Inverno e o no Outono é a simulação 3. Para a estação da Primavera é a simulação 1 que favorece uma maior redução no consumo em arrefecimento. Contrariamente, para a cidade de Évora e para as estações de Inverno e Outono, dado que as simulações que favorecem o aquecimento são, respectivamente, a simulação 3 e 6. Para as estações de Verão e Primavera é a simulação 1 que favorece o menor consumo em aquecimento. No entanto,

deve-se ter em conta que as estações da Primavera e Outono representam apenas um mês do ano sendo menos representativas.

Analisando as figuras 5.3, 5.8 e 5.13, referentes à razão entre os consumos do edifício com e sem fachada ventilada, verifica-se que é na cidade de Ovar onde se regista uma redução superior no consumo em aquecimento e arrefecimento.

De uma forma geral, verifica-se sempre uma redução nos consumos em aquecimento e arrefecimento, sendo que se nota uma redução mais acentuada na estação de Verão. Deve-se ter em conta que os consumos na estação de arrefecimento são muito inferiores aos da estação de aquecimento. Logo, apesar de na estação de Inverno as reduções dos consumos em aquecimento serem inferiores, consideram-se mais significativas uma vez que o número de meses da estação de Inverno é superior, variando estes de cidade para cidade.

5.2 Análise da solução construtiva aos diferentes parâmetros seleccionados

57

Na simulação do comportamento térmico de edifícios com fachadas ventiladas foram obtidos os graus dias ganhos para cada conjunto de parâmetros e os respectivos consumos em aquecimento e arrefecimento. O objectivo do presente ponto é analisar a sensibilidade dos diferentes parâmetros nas três regiões climáticas que caracterizam o clima português.

5.2.1 Eficiência das aberturas

Nas figuras 5.14 - 5.18 foram apresentados os resultados relativamente ao parâmetro eficiência das aberturas. Para as três cidades escolhidas no presente estudo o consumo em aquecimento e arrefecimento seguem o mesmo andamento.

Observando as figuras 5.14, 5.15 e 5.16 verifica-se que, à medida que o valor da eficiência das aberturas aumenta, o consumo em aquecimento aumenta. No entanto, o consumo em arrefecimento diminui.

Analisando as figuras 5.17 e 5.18 verifica-se que os $G.D_{\text{ganhos}}$ para as duas estações não apresentam a mesma evolução nas três cidades. Para a estação de aquecimento à medida que a eficiência das aberturas aumenta, os $G.D_{\text{ganhos}}$ na estação de aquecimento diminuem com excepção da cidade de Ovar. Para a estação de arrefecimento à medida que a eficiência das aberturas aumenta os $G.D_{\text{ganhos}}$ aumentam.

De uma forma geral, à medida que o consumo em aquecimento aumenta, os $G.D_{\text{ganhos}}$ para essa estação diminuem. Na estação de arrefecimento a situação inverte-se.

A cidade de Bragança é aquela que apresenta $G.D_{\text{ganhos}}$ superiores na estação aquecimento, e no entanto, inferiores na estação de arrefecimento. Na situação em este parâmetro variou entre 0.8 e 0.15, não se encontrou uma justificação aceitável para o facto de Ovar na estação de arrefecimento apresentar um aumento dos $G.D_{\text{ganhos}}$.

O parâmetro, eficiência das aberturas, depende da geometria das aberturas e da velocidade do vento. Este parâmetro vai favorecer a ventilação natural que vai ocorrer entre o exterior e a cavidade, à medida que este aumenta, a ventilação natural também aumenta. O aumento da ventilação vai provocar um aumento no consumo em aquecimento, no entanto uma diminuição no consumo em arrefecimento. Ou seja um aumento da ventilação natural vai favorecer a estação de arrefecimento e desfavorecer a estação de aquecimento.

De uma forma geral, este parâmetro deve apresentar um valor mínimo para a estação de aquecimento e, um valor máximo para a estação de arrefecimento.

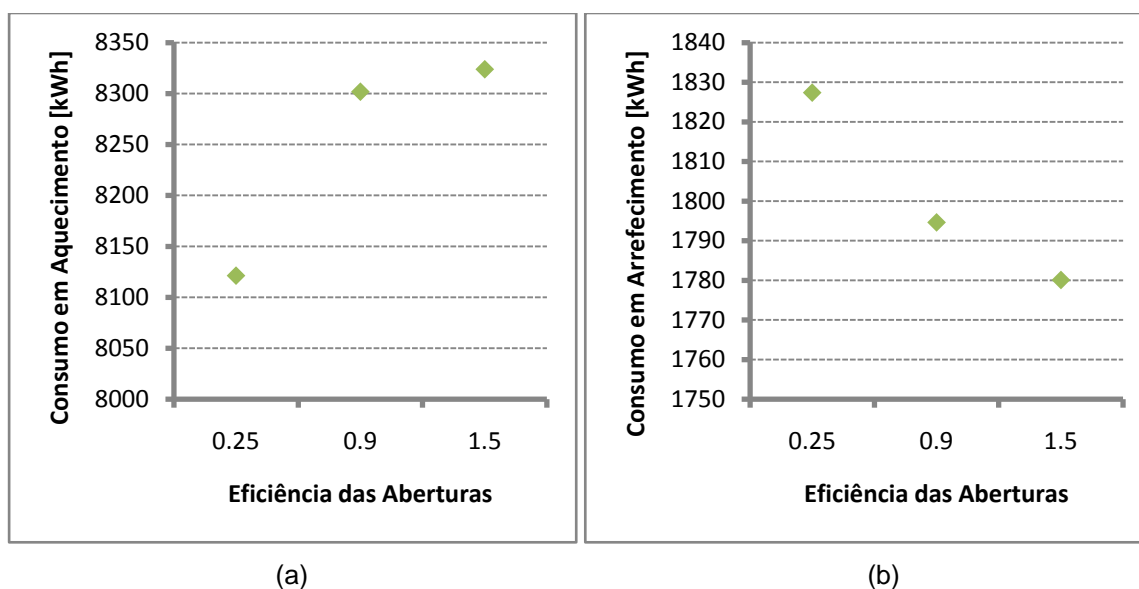


Figura 5.14 Resultados de Bragança: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

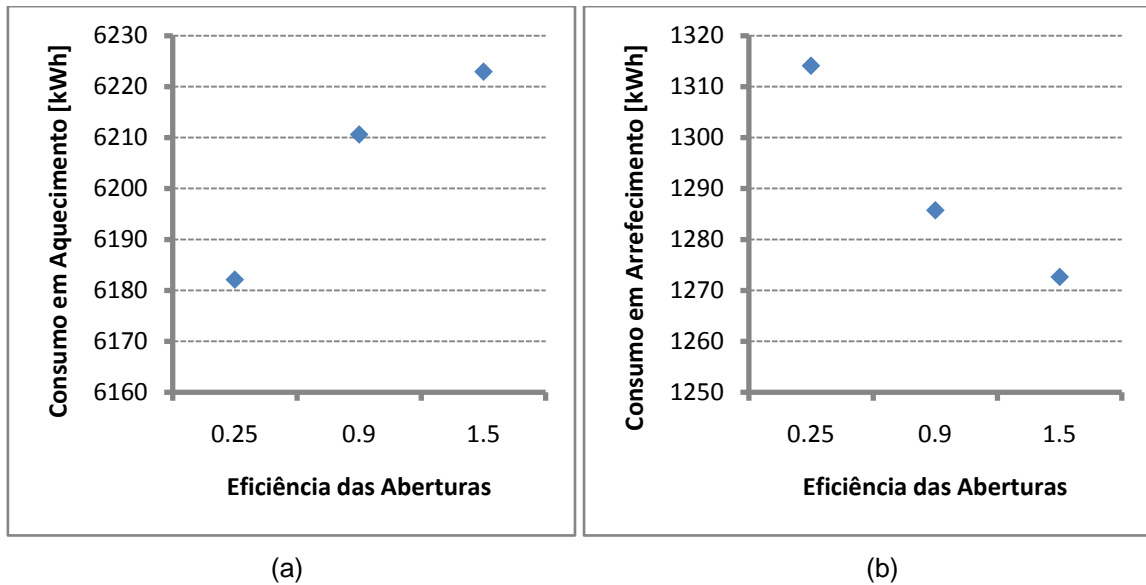


Figura 5.15 Resultados de Ovar: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

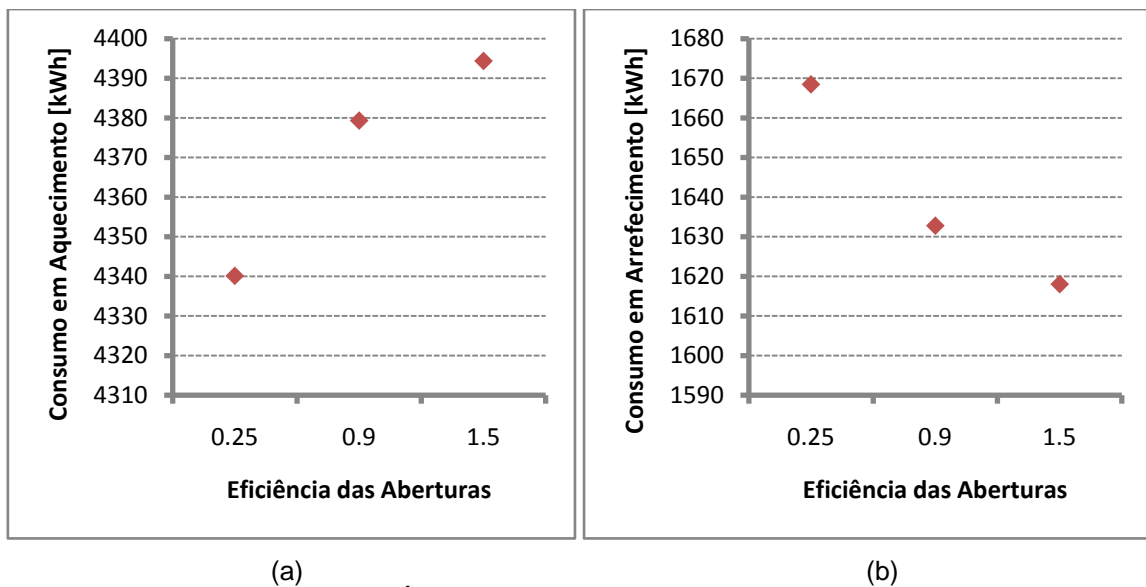


Figura 5.16 Resultados de Évora: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

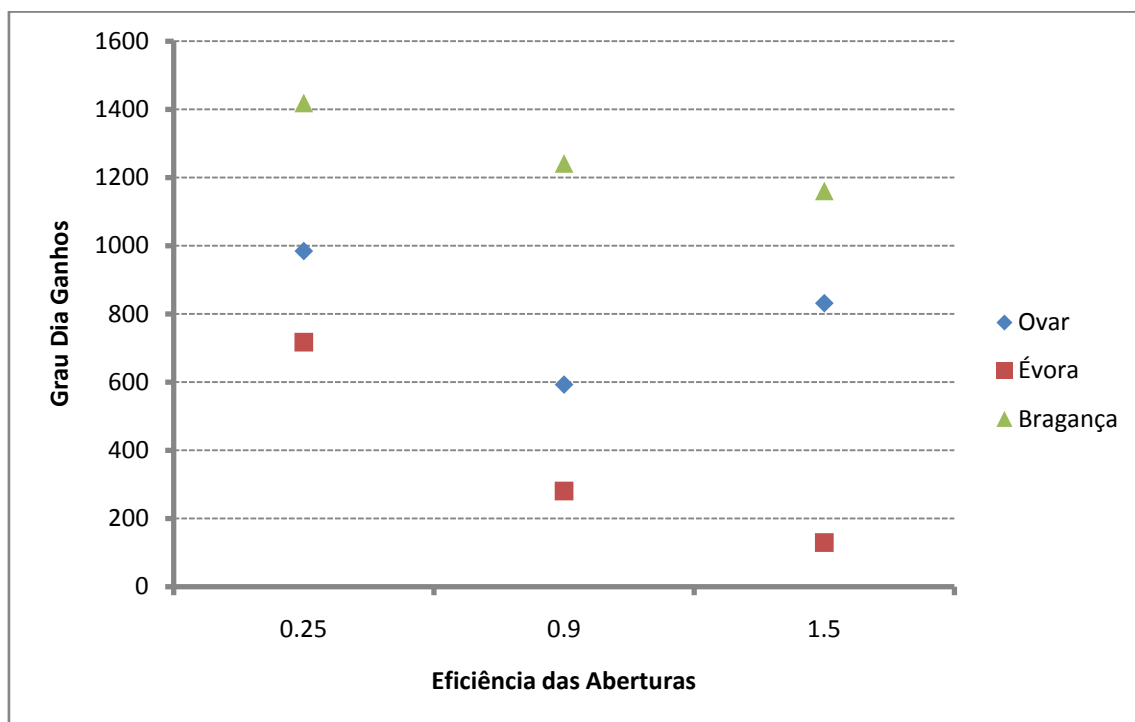


Figura 5.17 Grau Dia Ganhos no Inverno para as três cidades.

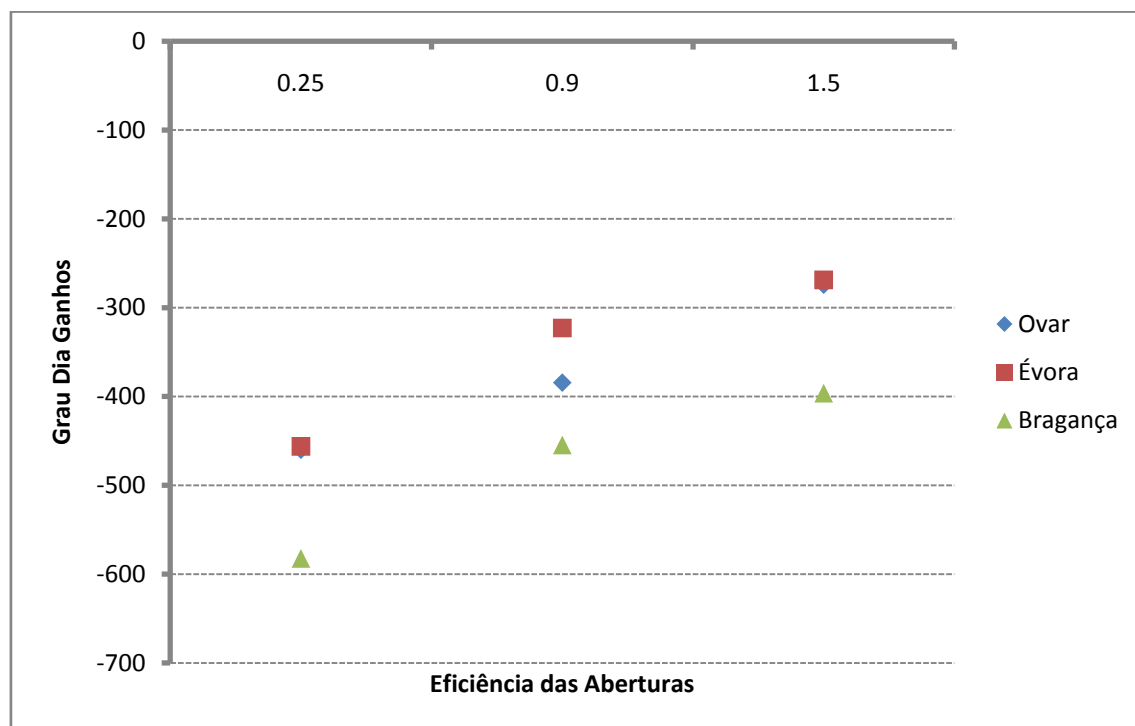


Figura 5.18 Grau Dia Ganhos no Verão para as três cidades.

5.2.2 Rugosidade

Os resultados referentes ao parâmetro rugosidade, podem ser observados nas figuras 5.19, 5.20 e 5.21. A rugosidade referente à superfície do deflector, só influencia o coeficiente de convecção, mais especificamente o coeficiente de convecção exterior. Em todas as simulações efectuadas, só foram registadas variações nas simulações 4, 5 e 6, onde se aplicaram as rugosidades: liso, médio liso e muito rugoso.

Observando as figuras 5.19 - 5.21, verifica-se que o comportamento da rugosidade do deflector segue a mesma tendência. Verifica-se que à medida que a rugosidade aumenta o consumo em aquecimento aumenta; no entanto, o consumo em arrefecimento diminui.

Observando as figuras 5.22 e 5.23 verifica-se que os $G.D_{\text{ganhos}}$ seguem a mesma tendência nas três cidades com a excepção da cidade de Ovar na estação de arrefecimento. Regista-se que à medida que os efeitos dos diferentes tipos de rugosidades variam, verifica-se uma diminuição dos $G.D_{\text{ganhos}}$ para a estação de aquecimento e, um aumento dos graus dias ganhos para a estação de arrefecimento.

Como seria de esperar, no Inverno e no Verão, o comportamento da rugosidade inverte-se tanto no consumo como nos $G.D_{\text{ganhos}}$. Esta inversão de comportamentos deve-se ao facto de um aumento da rugosidade provocar um aumento das perdas de carga no interior da cavidade. Este aumento das perdas de carga vai provocar uma diminuição da velocidade do ar no interior da cavidade e por consequência uma diminuição do coeficiente de convecção. Consequentemente provoca um aumento nas necessidades de aquecimento e uma diminuição nas necessidades de arrefecimento.

De uma forma geral, este parâmetro deve apresentar uma rugosidade lisa e muito rugosa respectivamente, na estação de aquecimento e na estação de arrefecimento.

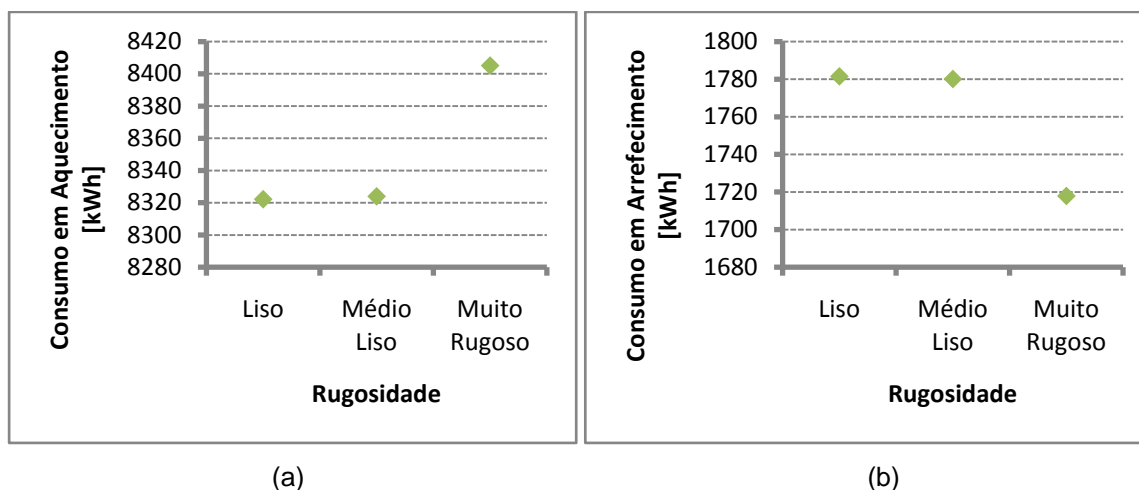


Figura 5.19 Resultados de Bragança: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

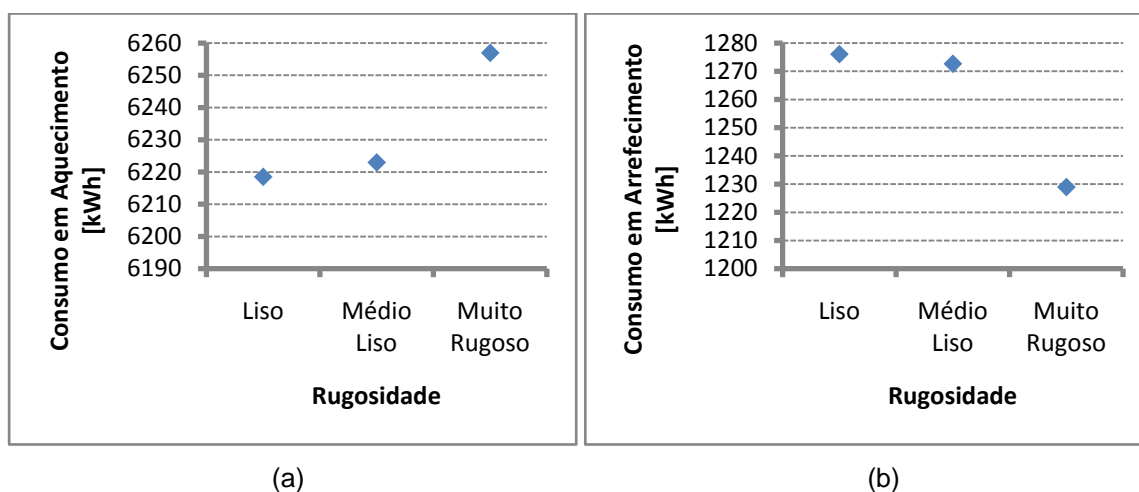


Figura 5.20 Resultados de Ovar: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

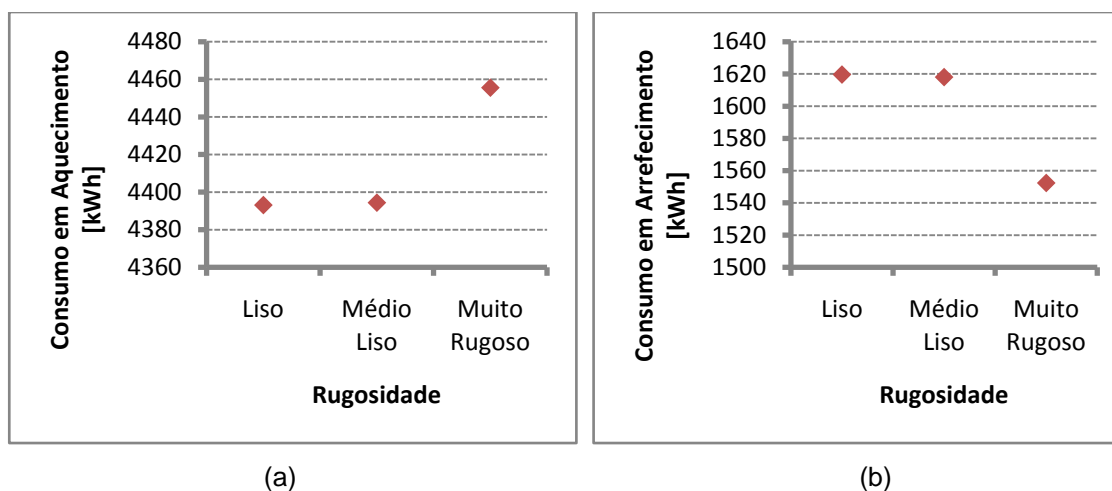


Figura 5.21 Resultados de Évora: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

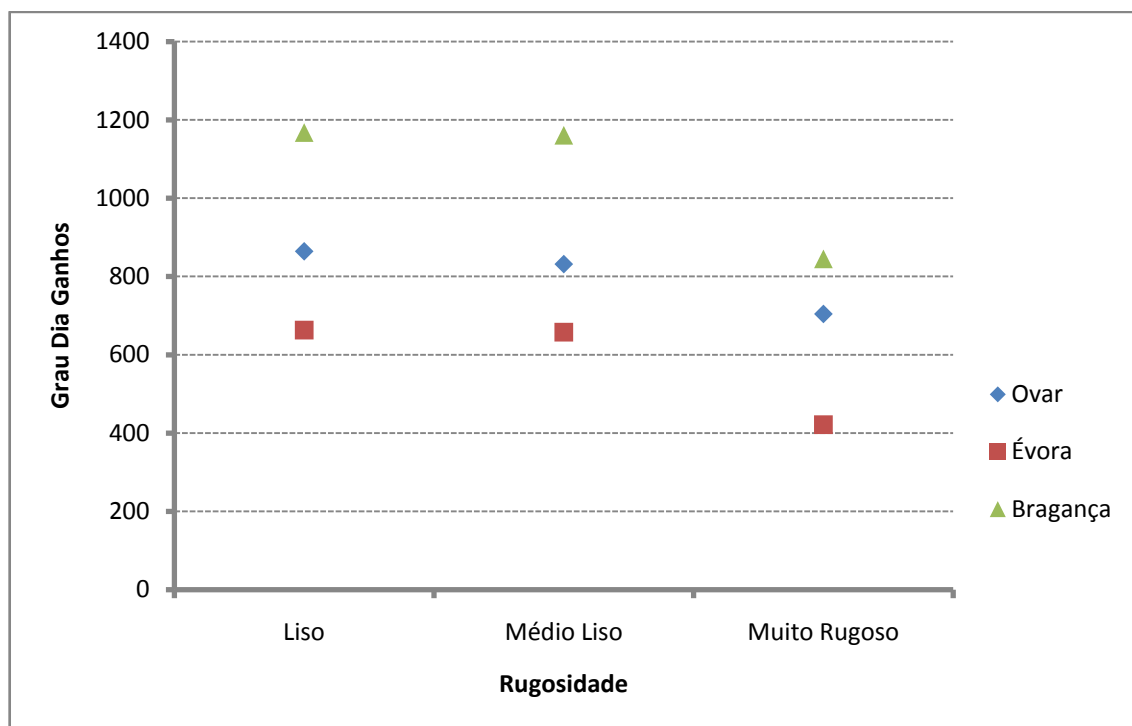


Figura 5.22 Grau Dia Ganhos no Inverno para as três cidades.

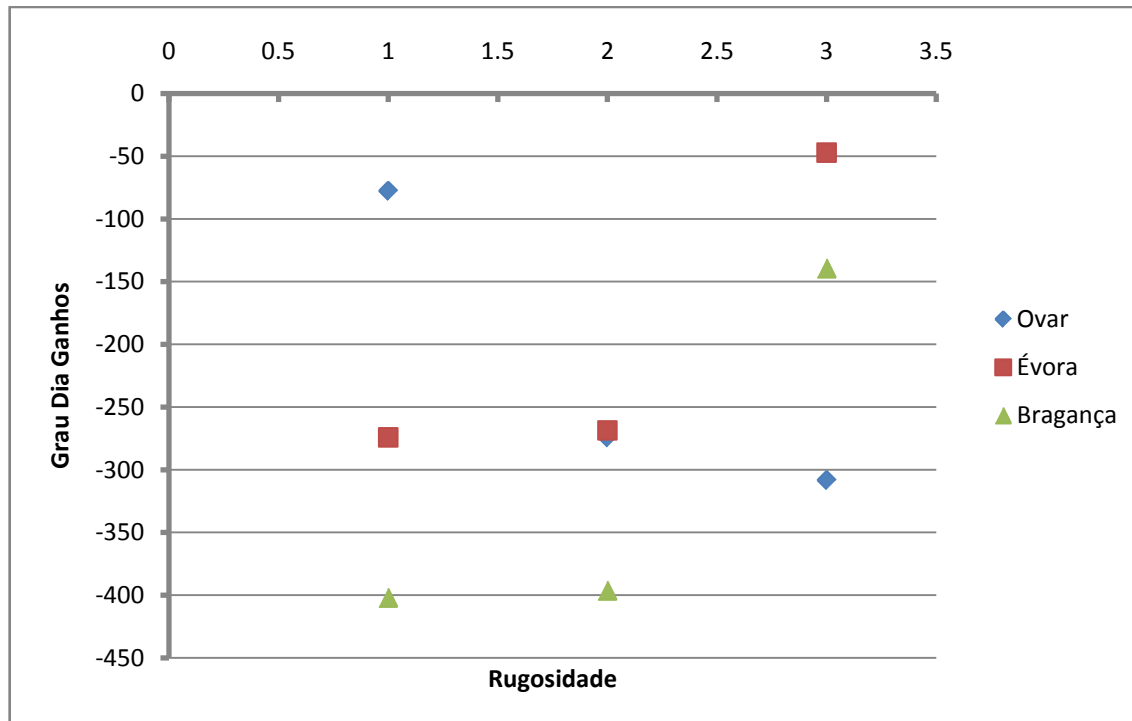


Figura 5.23 Grau Dia Ganhos no Verão para as três cidades

5.2.3 Absortividade

Nas figuras 5.24 - 5.28 são apresentados os resultados relativos ao parâmetro absortividade. Para as três cidades escolhidas no presente estudo o consumo em aquecimento e arrefecimento e os respectivos graus dias ganhos não seguem o mesmo andamento.

Observando as figuras 5.25 e 5.26 verifica-se que à medida que o valor da absortividade aumenta os consumos em aquecimento na estação de Inverno também aumentam. No entanto para na cidade de Bragança o mesmo não se verifica.

Analisando as figuras 5.27 e 5.28 verificou-se, que à medida que os $G.D_{\text{ganhos}}$ aumentam o consumo em arrefecimento diminui, no entanto, o consumo em aquecimento aumenta para as cidades de Évora e Bragança.

Na cidade Ovar, quando o parâmetro absortividade varia entre 0.5 e 0.8 observa-se uma diminuição no consumo em arrefecimento. Uma possível explicação para esta diminuição, deve-se ao facto de um aumento da absortividade provocar um aumento da temperatura no interior da cavidade. Este aumento de temperatura provoca um maior gradiente de temperatura que favorece o caudal de ar devido à pluma térmica, e consequentemente, o consumo em arrefecimento diminui.

Para a mesma cidade e analisando a figura 5.27 verifica-se que quando o parâmetro absortividade varia entre o valor 0.5 e 0.8 os $G.D_{\text{ganhos}}$ diminuem. Uma possível explicação para o facto de os $G.D_{\text{ganhos}}$ diminuírem, pode suceder do facto de um aumento da absortividade provocar um aumento da temperatura. No entanto, ao contrário do que acontecia anteriormente, este aumento de temperatura tem um efeito nefasto na estação de aquecimento. Como foi observado no ponto 5.1 uma diminuição do caudal favorece a estação de aquecimento. Uma vez que, a diminuição ou mesmo a ausência deste leva a que a fachada ventilada funcione como uma segunda camada isoladora aumentando a resistência térmica da casa.

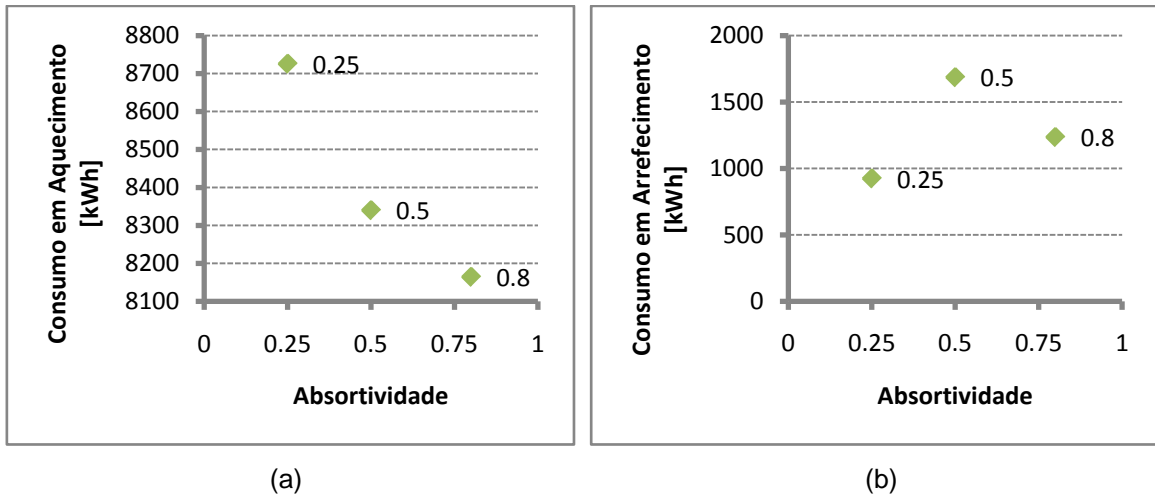


Figura 5.24 Resultados de Bragança: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

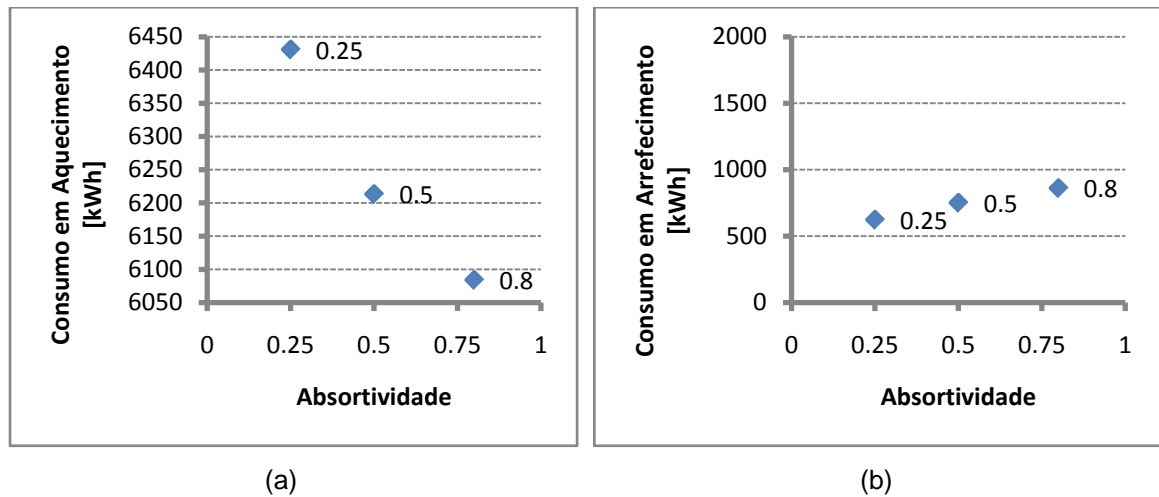


Figura 5.25 Resultados de Ovar: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

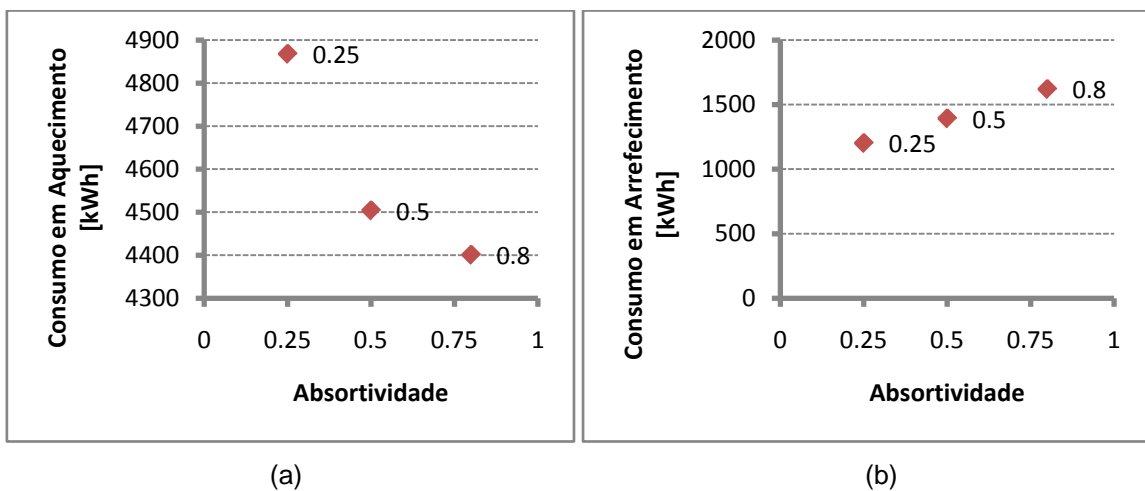


Figura 5.26 Resultados de Évora: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

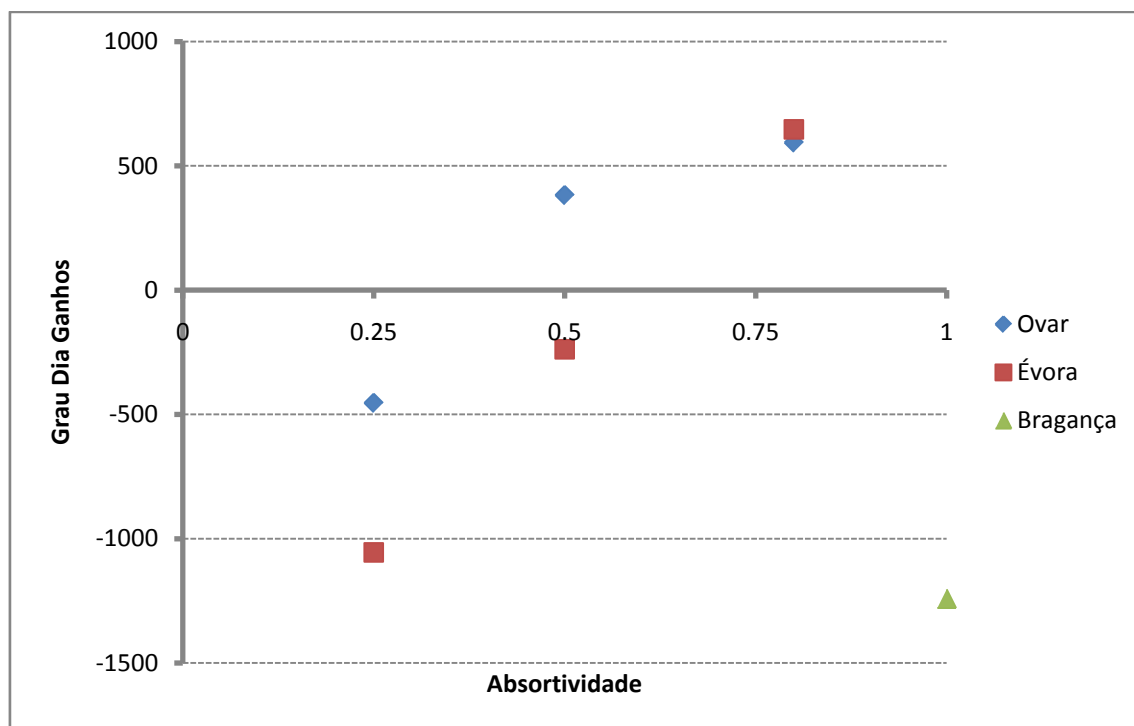


Figura 5.27 Grau Dia Ganhos no Inverno para as três cidades.

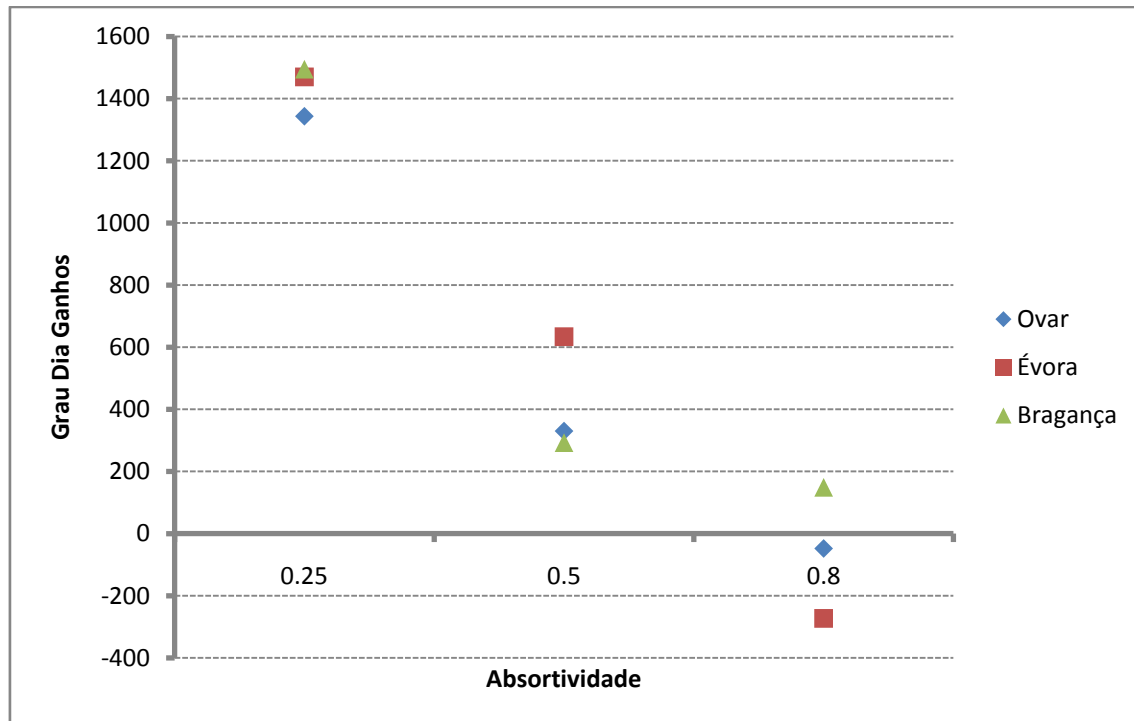


Figura 5.28 Grau Dia Ganhos no Verão para as três cidades.

5.2.4 Fracção da área das aberturas

Os resultados referentes ao parâmetro fracção da área das aberturas, podem ser observados nas figuras 5.29 - 5.38. Nas figuras 5.29 - 5.33 podem ser observados os resultados referentes às simulações 8, 9 e 10. Nas figuras 5.34 - 5.38 podem ser observados os resultados referentes as simulações 10, 11 e 12.

Observando as figuras 5.29 - 5.33 verifica-se que o comportamento da fracção da área das aberturas segue a mesma tendência. Verifica-se que à medida que a fracção da área das aberturas diminui, o consumo em aquecimento diminui e o consumo em arrefecimento aumenta.

A fracção da área das aberturas é um parâmetro fundamental na prestação da fachada ventilada. Como já foi observado no ponto 5.1, um aumento no valor da fracção da área das aberturas favorece a estação de arrefecimento e desfavorece a estação de aquecimento.

Analisando os gráficos 5.32, 5.33, 5.37 e 5.38 verifica-se que o comportamento da fracção da área das aberturas não segue a mesma tendência para três cidades. Não existe explicação aparente para o facto de os $G.D_{\text{ganhos}}$ não seguirem a mesma tendência nas três cidades.

De uma forma geral, este parâmetro deve apresentar um valor mínimo para a estação de arrefecimento, e um valor máximo para a estação de aquecimento. Devemos ter em conta que este é um dos únicos parâmetros que é possível alterar de estação para estação.

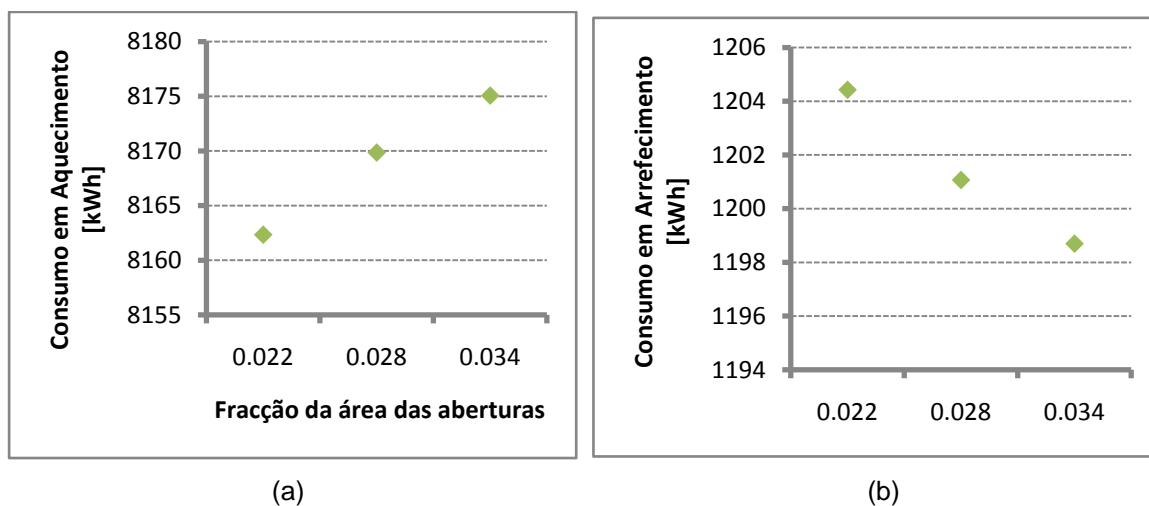


Figura 5.29 Resultados de Bragança: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento

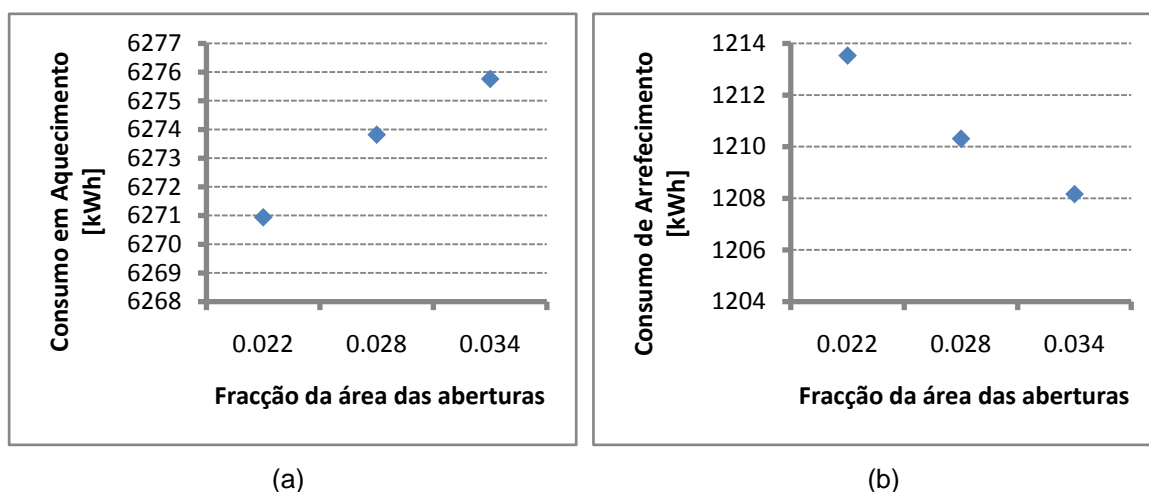


Figura 5.30 Resultados de Ovar: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

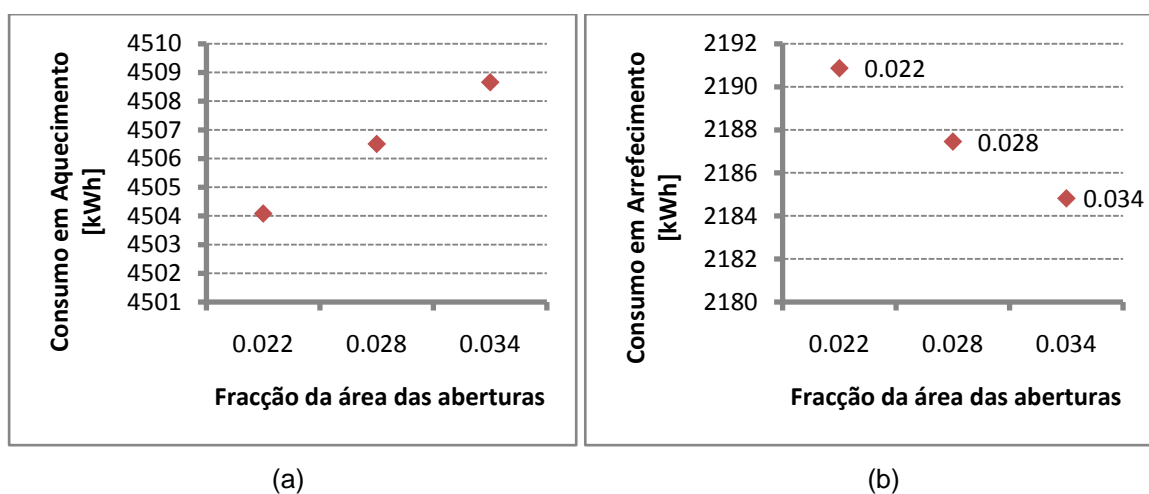


Figura 5.31 Resultados de Évora: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

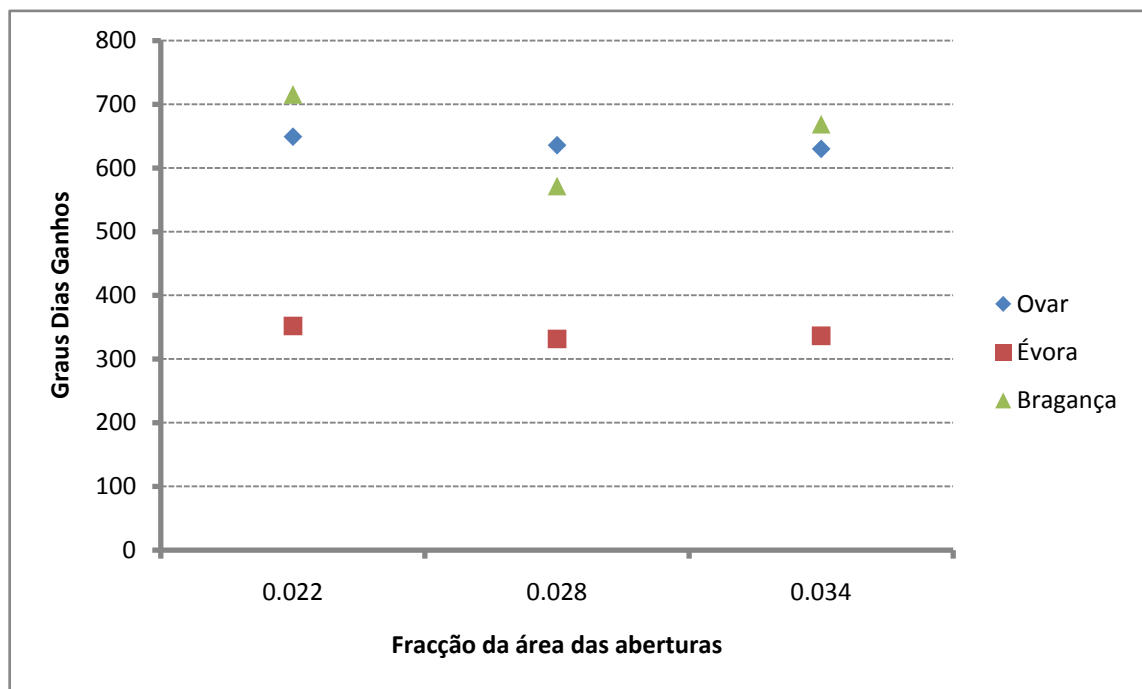


Figura 5.32 Grau Dia Ganhos no Inverno para as três cidades.

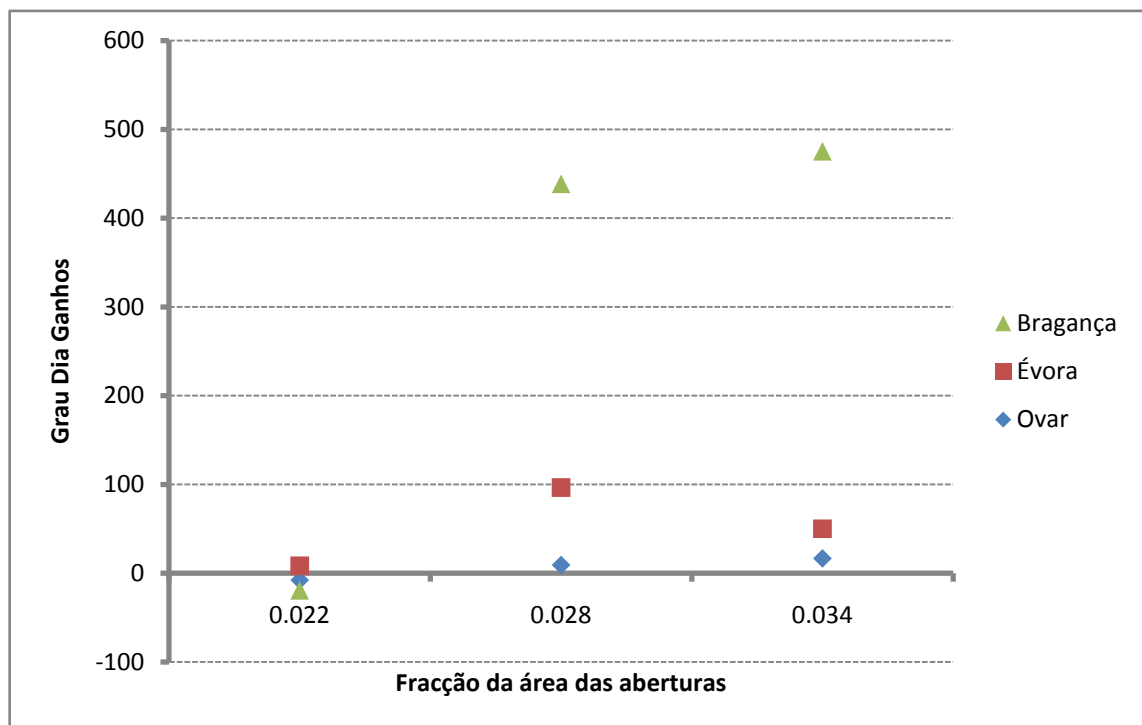
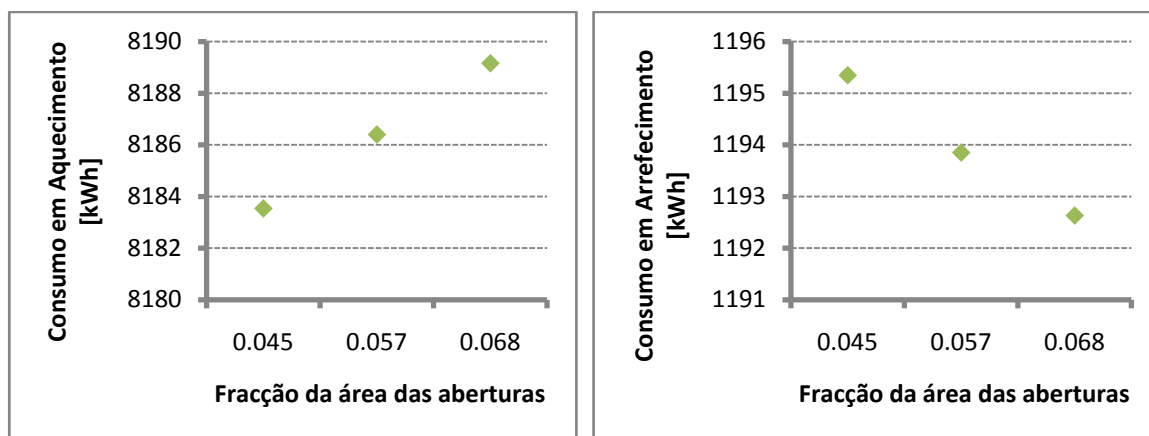


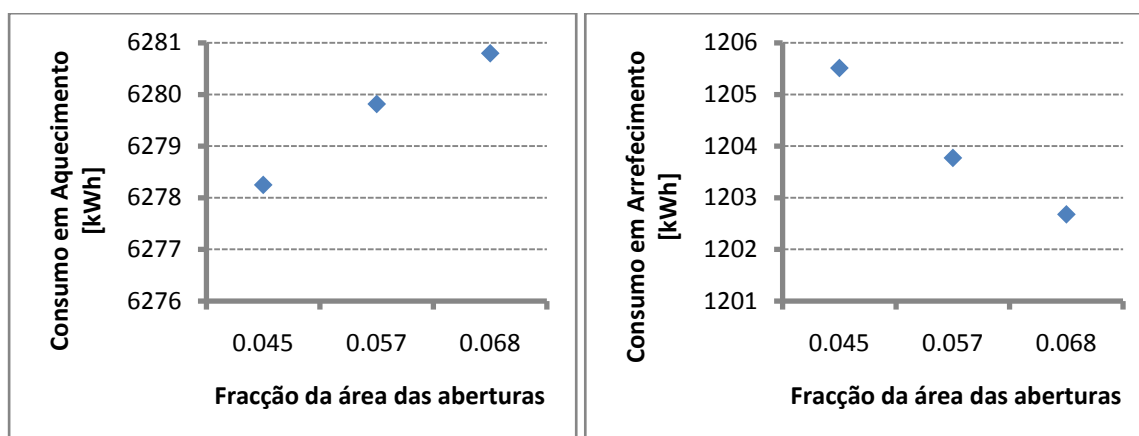
Figura 5.33 Grau Dia Ganhos no Verão para as três cidades



(a)

(b)

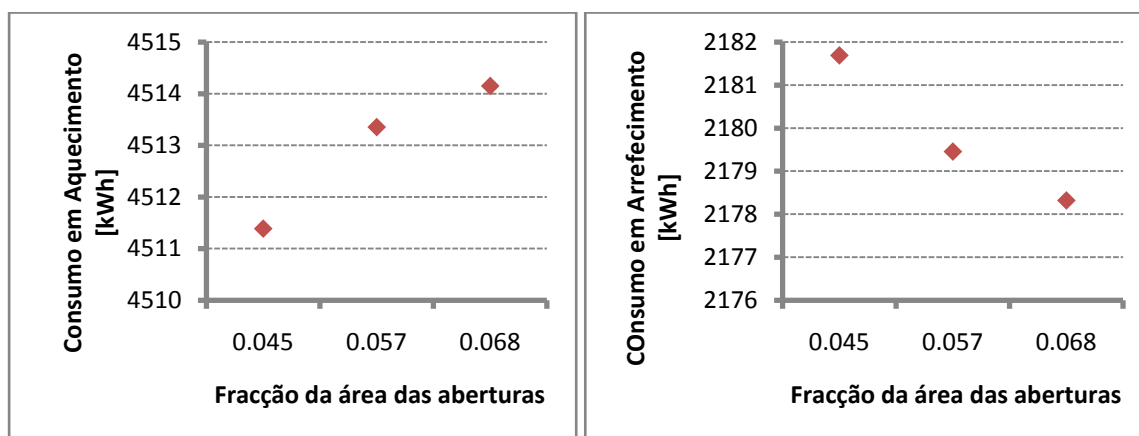
Figura 5.34 Resultados de Bragança: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.



(a)

(b)

Figura 5.35 Resultados de Ovar: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.



(a)

(b)

Figura 5.36 Resultados de Évora: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

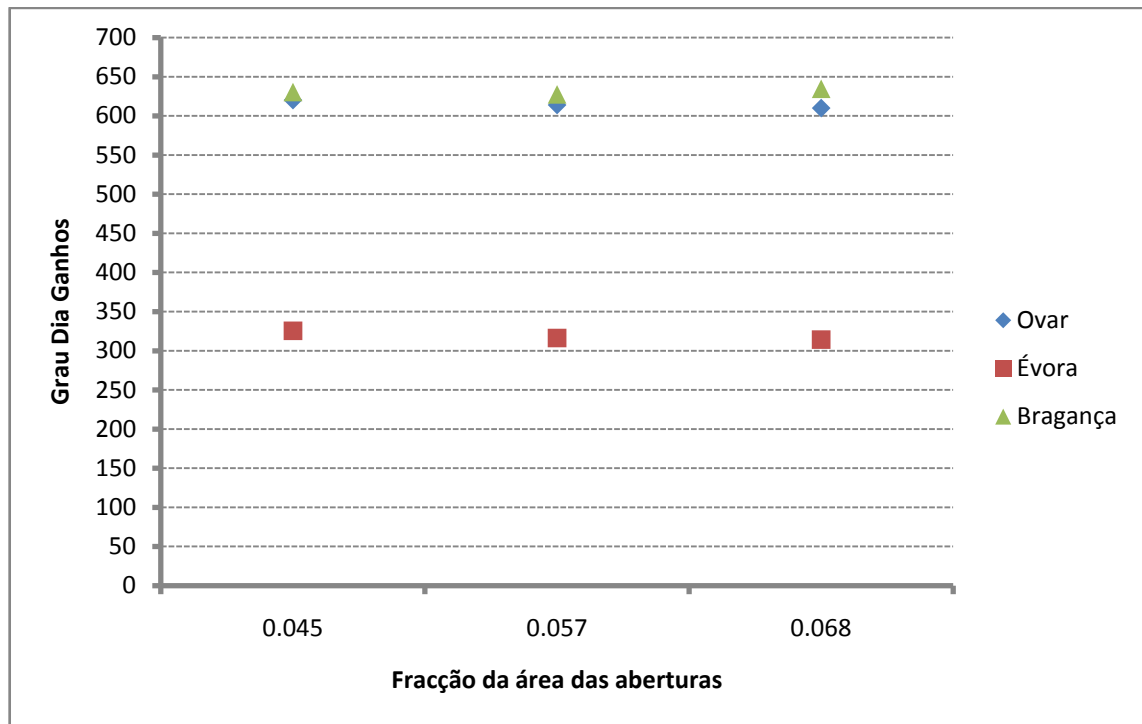


Figura 5.37 Grau Dia Ganhos no Inverno para as três cidades.

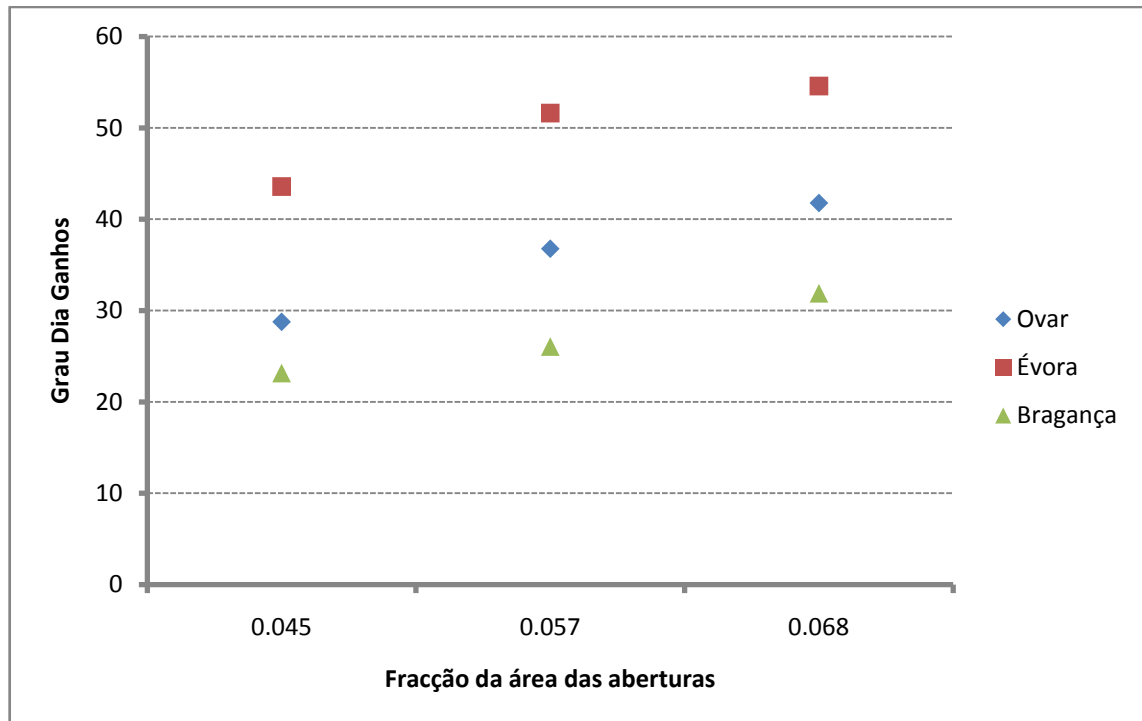


Figura 5.38 Grau Dia Ganhos no Verão para as três cidades.

5.2.5 Espessura da cavidade

Os resultados referentes ao parâmetro Espessura da cavidade, podem ser observados nas figuras 5.39 - 5.43.

Observando as figuras 5.39 - 5.41 verifica-se que o comportamento da espessura da cavidade não segue a mesma tendência nas três cidades. Analisando as figuras 5.39 e 5.40 verifica-se que não existem alterações significativas nos consumos em aquecimento e arrefecimento quando o parâmetro espessura da cavidade variou entre 0.1 e 0.2.

Para a cidade de Évora verificou-se que à medida que a espessura da cavidade aumenta o consumo em aquecimento e arrefecimento também aumenta. Não existe explicação aparente para na cidade de Évora este parâmetro ter um comportamento diferente.

Analisando as figuras 5.42 e 5.43 verifica-se que os $G.D_{\text{ganhos}}$ também não apresentam uma variação significativa à medida que a espessura da cavidade aumenta.

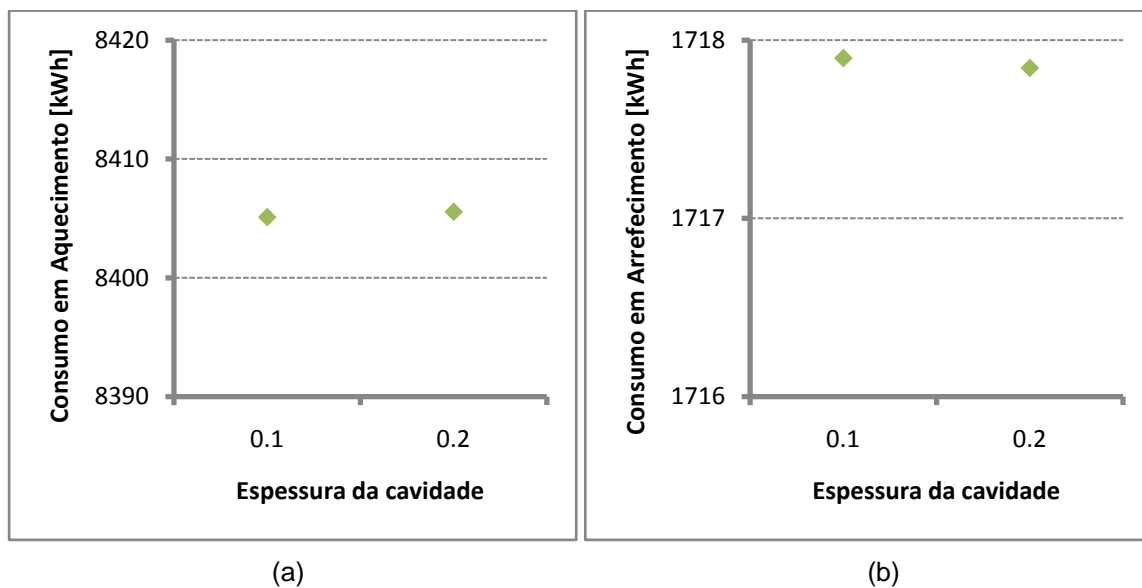


Figura 5.39 Resultados de Bragança: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento

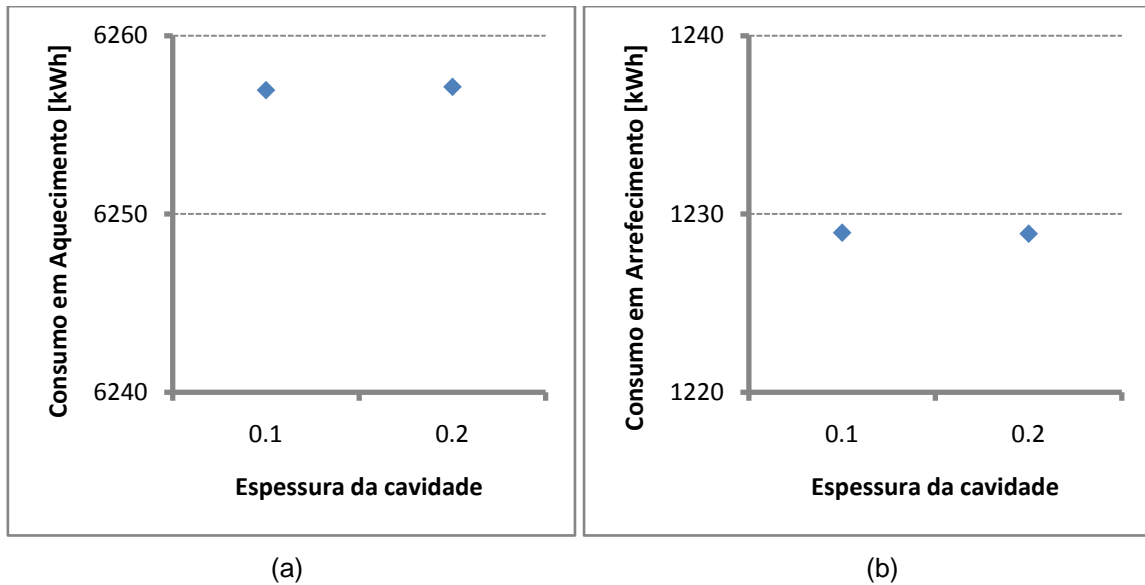


Figura 5.40 Resultados de Ovar: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

73

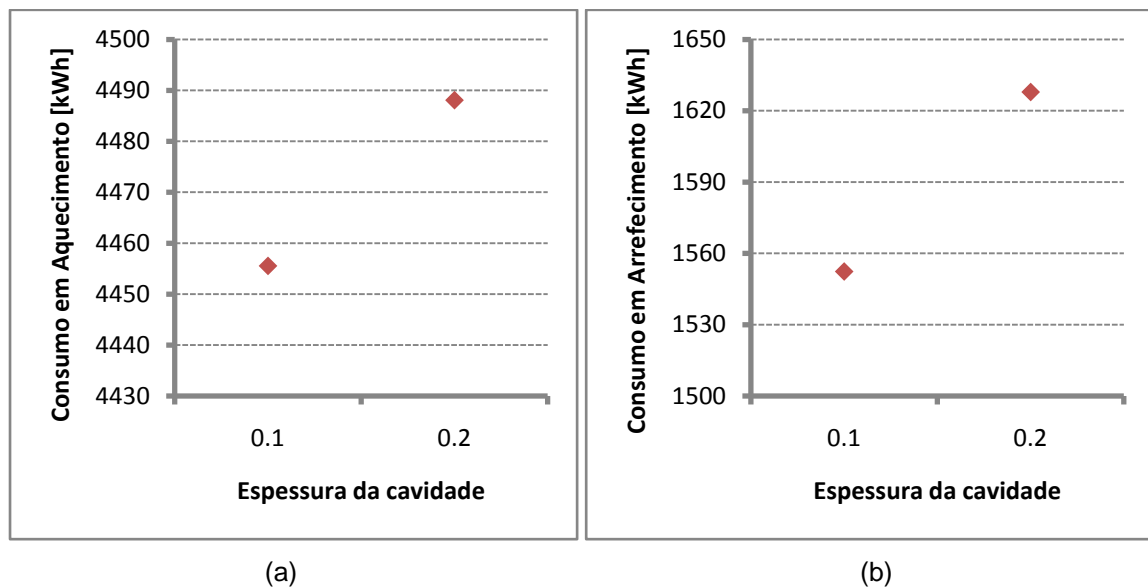


Figura 5.41 Resultados de Évora: (a) Consumo em aquecimento e (b) Consumo em arrefecimento.

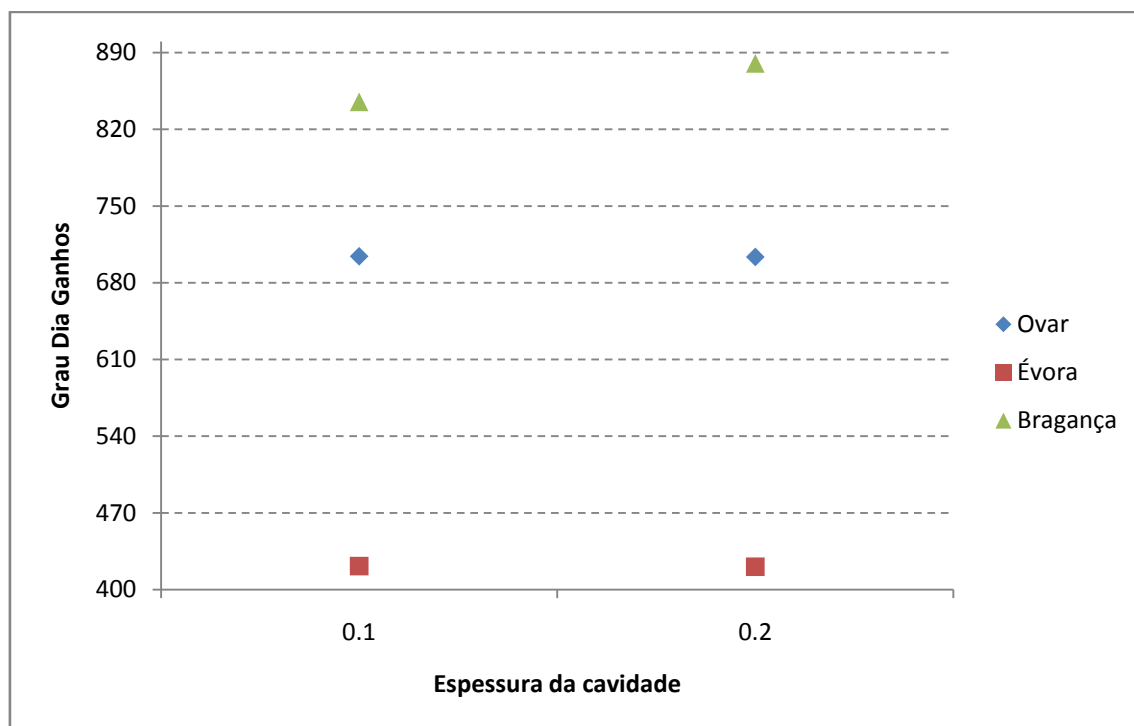


Figura 5.42 Grau Dia Ganhos no Inverno para as três cidades.

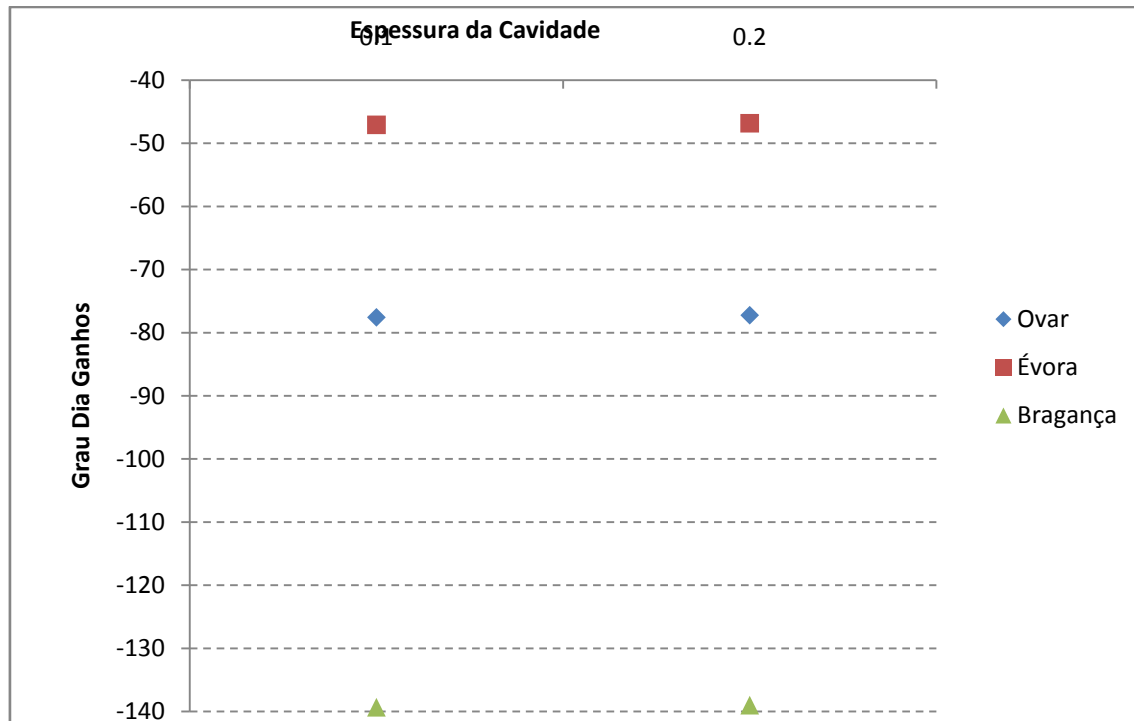


Figura 5.43 Grau Dia Ganhos no Verão para as três cidades

5.3 Análise do desempenho nas diferentes orientações do edifício

Nas figuras 5.44 - 5.49 são apresentados os gráficos referentes ao comportamento de cada fachada, em cada simulação. Apenas são apresentados os gráficos para as estações de Inverno e Verão de cada região climática.

Observando as figuras 5.44 - 5.49 verifica-se que, de uma forma geral, para a estação de aquecimento, ao contrario daquilo que seria de esperar, a fachada orientada a Norte é aquela que apresenta valores de Graus Dias superiores. Uma possível justificação para a fachada orientada a Norte apresentar uma melhor prestação, é o facto de nesta quase não ocorrer vento de norte, e a radiação apresenta valores muito baixos. O caudal de ar que circula no interior da cavidade provavelmente é reduzido. Assim, na fachada orientada a Norte, o deflector funciona como uma segunda camada isolante aumentando a resistência térmica da casa.

Na estação de aquecimento, e para as três regiões climáticas, verifica-se que é na simulação 3 que se obtém o maior Graus Dias Ganhos para a fachada orientada a Sul, Norte, Oeste e Este. Podemos também verificar que é a simulação 3 que se verifica o menor consumo em aquecimento. De uma forma geral podemos afirmar que na estação de aquecimento todas as fachadas devem apresentar o conjunto de parâmetros reunidos na simulação 3.

Na estação de arrefecimento para a região climática de Ovar e Évora, verifica-se que é a simulação 1 que reúne o conjunto de parâmetros que favorece a fachada orientada a Sul, Norte, Oeste.

Na cidade de Bragança, é a simulação 1 que reúne o conjunto de parâmetros mais favoráveis, com a excepção da fachada orientada a oeste na região de Bragança.

Na estação de arrefecimento, e como seria de esperar, a fachada orientada a aplicação do conceito fachada ventilada não é significativamente justificado sob o ponto de vista térmico. No entanto, embora não constitua alvo de estudo neste trabalho, existe outros factores que justificam essa aplicação, nomeadamente os efeitos da humidade.

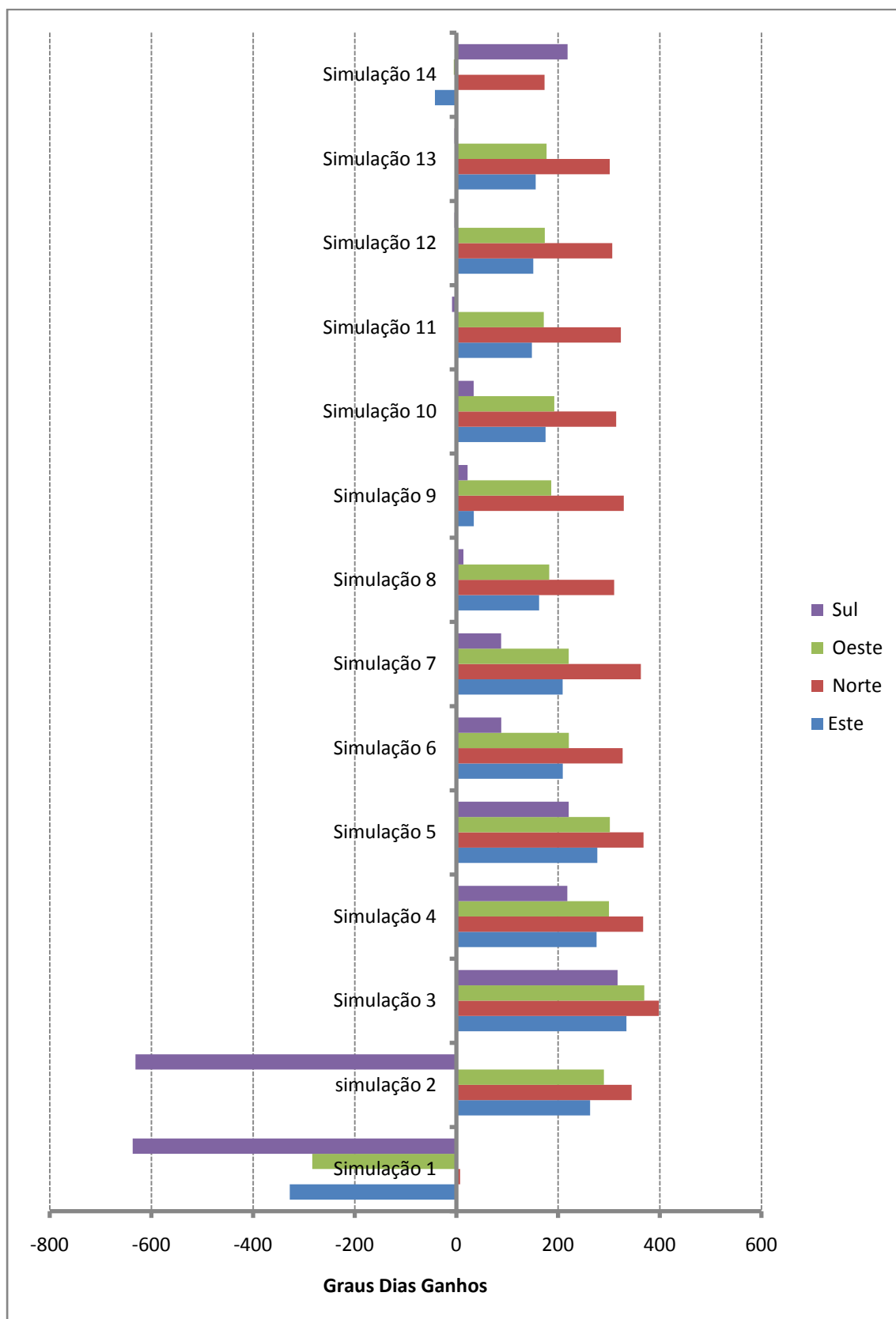


Figura 5.44 Comportamento das diferentes fachadas nas várias simulações realizadas para a estação de Inverno em Bragança.

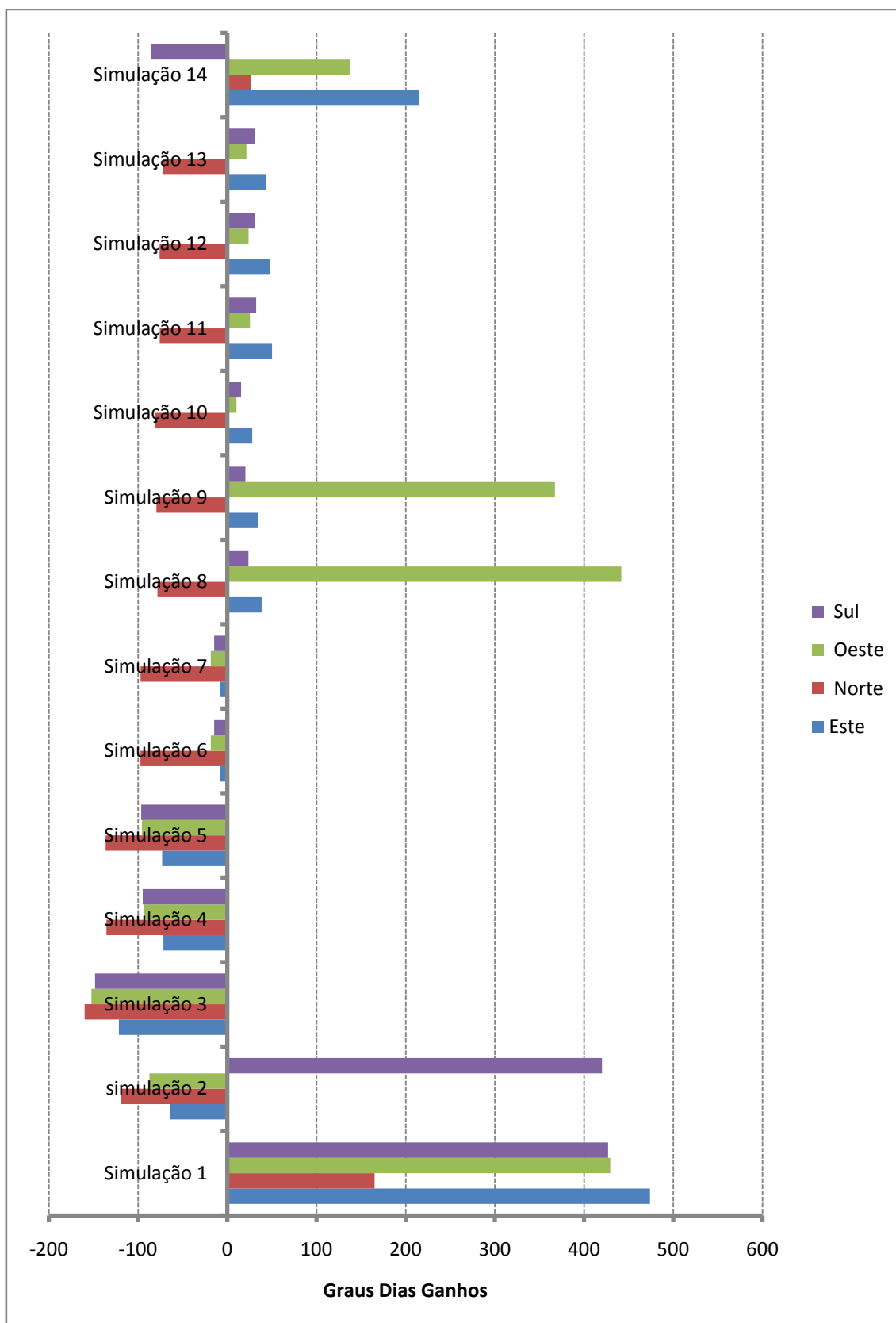


Figura 5.45 Comportamento das diferentes fachadas nas várias simulações realizadas para a estação de Verão em Bragança.

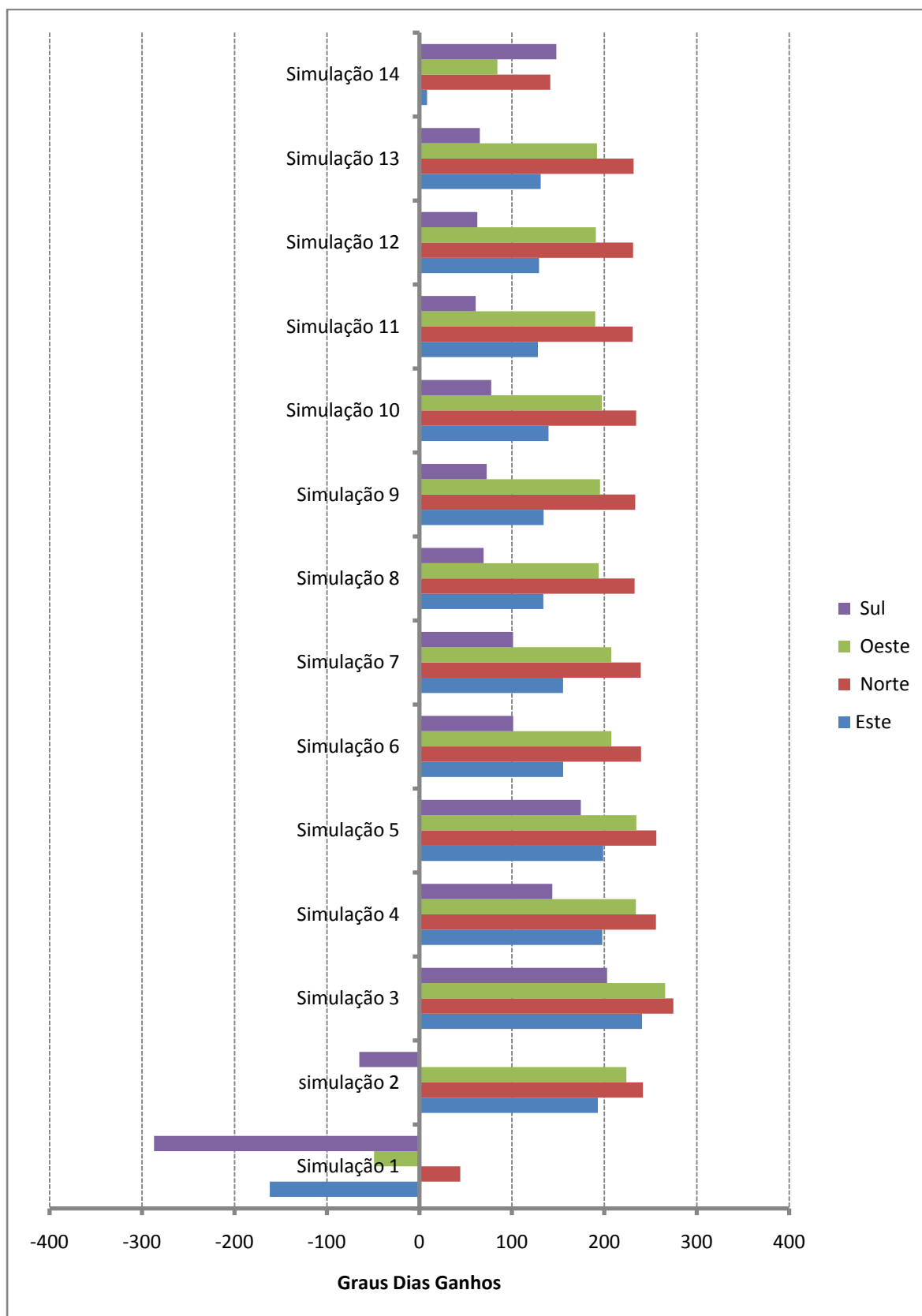


Figura 5.46 Comportamento das diferentes fachadas nas várias simulações realizadas para a estação de Inverno em Ovar.

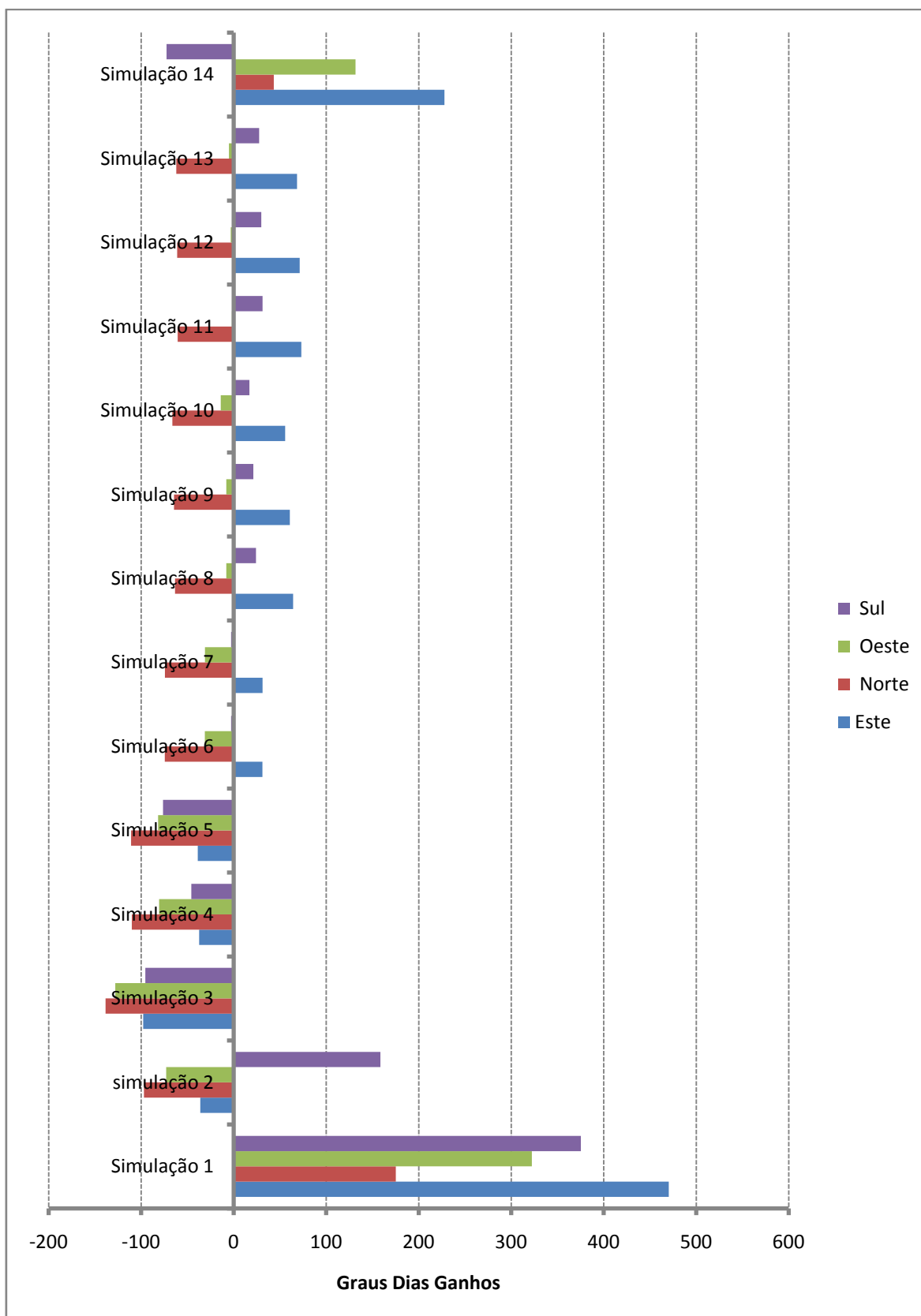


Figura 5.47 Comportamento das diferentes fachadas nas várias simulações realizadas para a estação de Verão em Ovar.

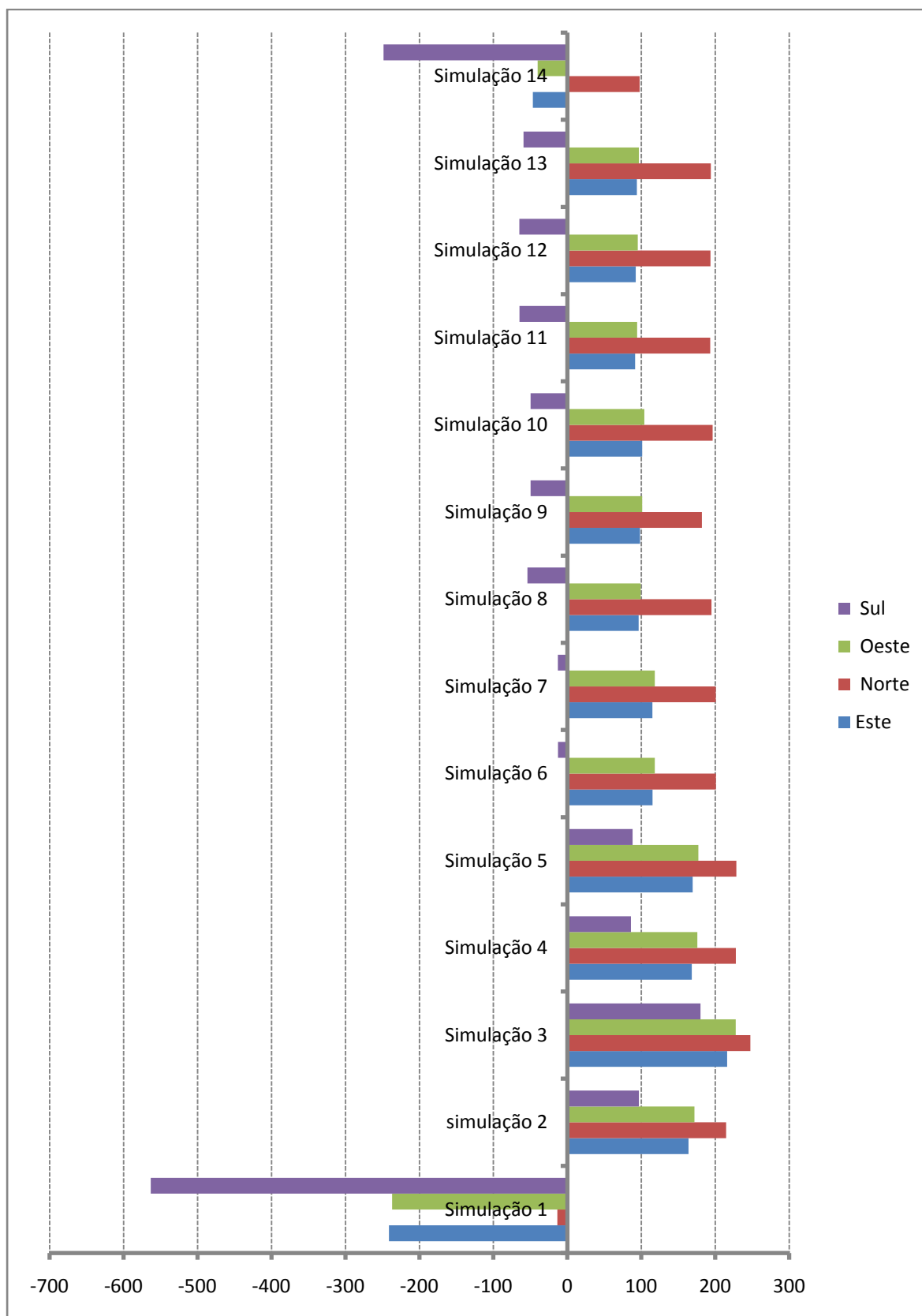


Figura 5.48 Comportamento das diferentes fachadas nas várias simulações realizadas para a estação de Inverno em Évora.

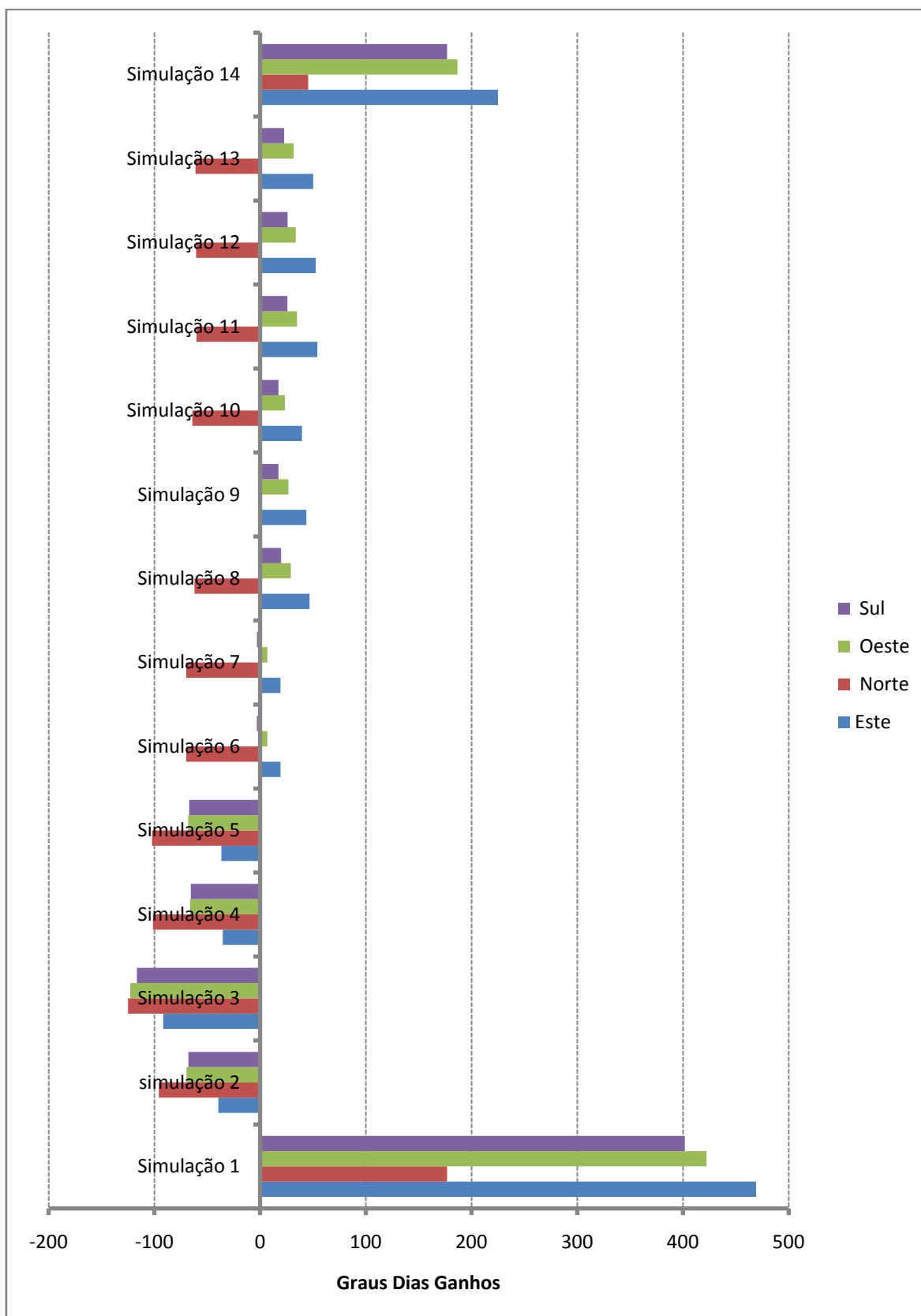


Figura 5.49 Comportamento das diferentes fachadas nas várias simulações realizadas para a estação de Verão em Évora.

5.4 Análise da solução óptima

Observando os resultados obtidos, verificou-se que não existia um conjunto de parâmetros que favoreça tanto a estação de Verão como a de Inverno.

De forma a encontrar a solução óptima para cada estação (Inverno/Verão) foi necessário perceber qual a tendência individual de cada parâmetro de entrada, para tal efectuou-se um estudo das respectivas “derivadas parciais” de cada parâmetro no ponto 5.2.

A solução óptima para cada estação, foi obtida com base na simulação com melhor desempenho (no ponto 5.1) afectada da tendência obtida através da análise individual de cada parâmetro.

Como se torna difícil ou mesmo quase impossível alterar os vários parâmetros de estação para estação e por se verificar que a fracção da área das aberturas era um parâmetro crítico para a estação de aquecimento, verificou-se que o único parâmetro que poderia ser alterado era a fracção da área das aberturas.

82

Optou-se por fazer duas abordagens distintas de modo a encontrar soluções que favoreçam cada uma das estações.

A primeira abordagem escolhida favorece a estação de Verão (simulação 15), sendo que a respectiva solução óptima Inverno apresenta a fracção da área das aberturas um valor nulo.

A segunda abordagem favorece então a estação de Inverno (simulação 16), sendo que a respectiva solução óptima Verão apresenta a fracção da área das aberturas um valor máximo (0.034).

Tabela 5.1 Valores dos parâmetros utilizados na simulação 15 (Óptimo Verão)

| | Fracção da área das aberturas | Emissividade e Absortividade | Espessura efectiva da cavidade [m] | Rugosidade | Eficiência das Aberturas |
|-----------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|------------|--------------------------------|
| Bragança | 0.034 | 0.25 | 0.1 | Médio Liso | 0.9 |
| Ovar | 0.034 | 0.25 | 0.1 | Médio Liso | 0.9 |
| Évora | 0.034 | 0.25 | 0.1 | Médio Liso | 0.9 |

Tabela 5.2 Valores dos parâmetros utilizados na simulação 16 (ótimo de Inverno)

| | Fracção da área das aberturas | Emissividade e Absortividade | Espessura efectiva da cavidade [m] | Rugosidade | Eficiência das Aberturas |
|-----------------|--|---|---|-------------------|---|
| Bragança | 0 | 0.8 | 0.1 | Médio Liso | 0.25 |
| Ovar | 0 | 0.8 | 0.1 | Médio Liso | 0.25 |
| Évora | 0 | 0.8 | 0.1 | Médio Liso | 0.25 |

Tendo em conta a primeira abordagem, o consumo global (E1) obtido através da solução óptima regulada pelo Verão corresponde à soma das respectivas necessidades de aquecimento e arrefecimento (simulação 15).

O consumo global (E2) é obtido de forma análoga à anterior, mas tendo por base a solução óptima regulada pelo Inverno (simulação 16).

De seguida são apresentados os resultados da simulação 15 e 16.

83

Tabela 5.3 Resultados da simulação 15

| | Consumo em Aquecimento | Consumo em Arrefecimento | E1 | Edifício sem Fachadas Ventiladas |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------|---|
| Bragança | 8141.90 | 907.97 | 9049.87 | 10422.35 |
| Ovar | 6408.95 | 620.49 | 7029.44 | 8013.79 |
| Évora | 4826.35 | 1198.09 | 6024.44 | 6862.26 |

Analisando os resultados da Tabela 15, referentes ao óptimo anual regulado pelo Verão, verifica-se sempre uma diminuição no consumo global quando comparado com o edifício sem fachadas ventiladas nas três cidades.

Tabela 5.4 Resultados da simulação 16

| | Consumo em Aquecimento | Consumo em Arrefecimento | E1 | Edifício sem Fachadas Ventiladas |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------|---|
| Bragança | 7729.56 | 1257.84 | 8987.40 | 10422.35 |
| Ovar | 5889.28 | 865.73 | 6755.01 | 8013.79 |
| Évora | 4171.00 | 1607.73 | 5778.73 | 6862.26 |

Analisando os resultados do óptimo anual regulado pelo Inverno, verifica-se que também se observa uma redução no consumo global, nas três cidades.

Após esta análise comparou-se os valores obtidos com os do edifício sem fachadas ventiladas como se pode observar no gráfico 5.50.

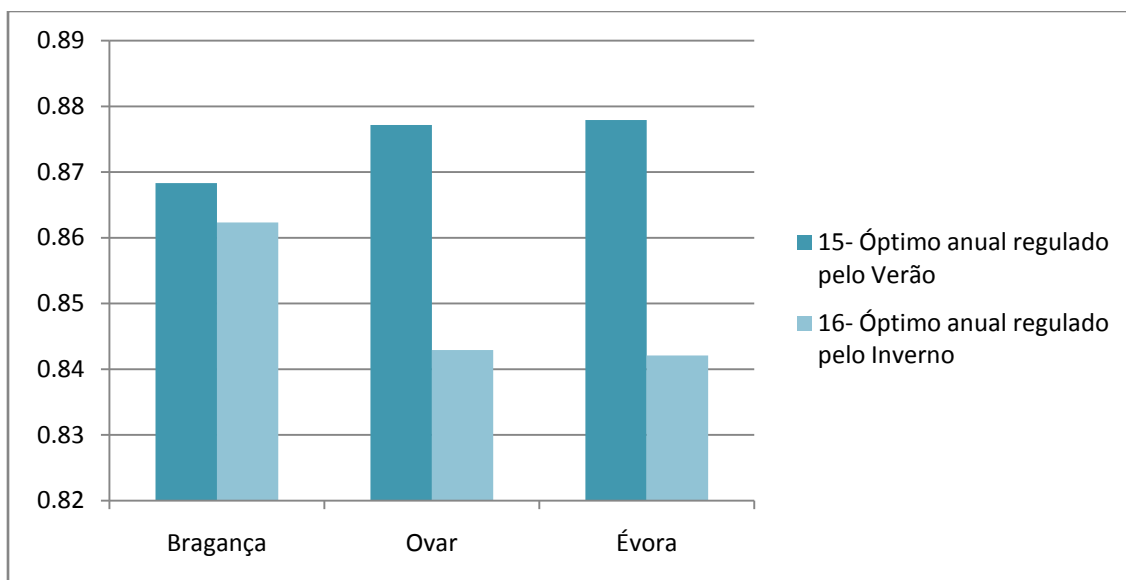


Figura 5.50 Razão de consumos da solução mista entre o edifício com e sem fachadas ventiladas

Analisando o gráfico da razão de consumos verifica-se, que para as três cidade, é no óptimo anual regulado pelo Inverno que se consegue uma redução superior no consumo global. Sendo que é na cidade de Évora onde se verifica uma redução superior.

Podemos afirmar que os parâmetros reunidos na simulação 16 e com a colocação de um regulador de caudal nas aberturas é a solução mista ótima para as três cidades.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo faz-se uma análise sintética dos trabalhos desenvolvidos, com o objectivo de compreender o comportamento dos edifícios com fachadas ventiladas. Para terminar, indicam-se algumas perspectivas de desenvolvimentos de trabalho futuro.

85

6.1 Conclusões

Com o trabalho desenvolvido no âmbito desta tese pretendeu-se aprofundar o conhecimento do comportamento térmico de um edifício com fachada ventilada.

Os consumos em aquecimento, arrefecimento e os Graus Dias Ganhos foram obtidos e calculados com base no programa *EnergyPlus*.

O objectivo principal do presente estudo era caracterizar o sistema construtivo para as diferentes regiões climáticas, de forma a propor regras de dimensionamento para as diferentes regiões. De uma forma geral podemos concluir que o sistema construtivo aqui em estudo favorece ambas as estações, verificando-se uma diminuição mais acentuada do consumo em arrefecimento.

Verificámos que as simulações 3 e 1 são as que permitem uma redução mais acentuada nos consumos em aquecimento e arrefecimento, respectivamente. Nestas simulações foram utilizados: Fracção da área das aberturas, Absortividade, espessura efectiva da cavidade, Rugosidade e eficiência das aberturas, sendo os únicos parâmetros diferentes o índice de absortividade (0.25 na simulação 1 e 0.8 na simulação 3) e a eficiência das aberturas (0.9 simulação 1 e 0.25 na simulação 3).

Poderemos então concluir que os parâmetros reunidos na simulação 3 são aqueles que permitem uma redução mais acentuada nos consumos em aquecimento para as três regiões estudadas. Para a estação de arrefecimento verifica-se que é o conjunto de parâmetros reunidos na simulação 1 que permitem uma redução mais acentuada nos consumos em arrefecimento.

Após uma análise global, estudaram-se de forma individual alguns dos parâmetros que influenciam o comportamento das fachadas ventiladas.

Foram analisados os parâmetros: Eficiência das Aberturas, Rugosidade, Emissividade e Absortividade, Fracção da Área das Aberturas e Espessura da Cavidade.

Concluimos que o parâmetro Eficiência das Aberturas deve apresentar um valor elevado se se pretender diminuir o consumo em aquecimento. Pelo contrário deve apresentar um valor inferior se o pretendido for diminuir o consumo em arrefecimento.

Observando os resultados da rugosidade pode concluir-se que uma parede muito rugosa favorece a estação de arrefecimento mas desfavorece a estação de aquecimento.

Analisando os resultados para o parâmetro Absortividade conclui-se, que a absortividade deve apresentar um valor inferior quando o pretendido é diminuir o consumo em arrefecimento. No entanto um valor superior quando o pretendido é diminuir o consumo em aquecimento.

Verificando os resultados obtidos para a fracção da área das aberturas pode concluir-se que à medida que a área das aberturas aumenta, o consumo em aquecimento aumenta. No entanto o consumo em arrefecimento diminui.

O último parâmetro estudado foi a Espessura da Cavidade, verificando-se pelos resultados obtidos que este não apresenta variações significativas nos consumos em aquecimento e arrefecimento. A única alteração observada foi na cidade de Évora.

Quando se observam os resultados obtidos para cada fachada individualmente, conclui-se que a fachada orientada a Norte é a que apresenta um melhor rendimento na estação de arrefecimento. No entanto, a que apresenta a pior prestação na estação de aquecimento.

Como já foi referido anteriormente, a Fracção da Área das Aberturas é o único parâmetro que é possível alterar de estação para estação. Observando os resultados obtidos para a simulação 15 e 16 concluiu-se que a solução óptima para as três cidades é a solução óptima regulada pelo Inverno. De uma forma geral verifica-se sempre uma diminuição no consumo global nas duas abordagens realizadas.

De uma forma geral, a aplicação de fachadas ventiladas diminui os consumos em aquecimento e arrefecimento. No entanto, a colocação deste sistema construtivo deve

ser feita com precaução. Contudo, a alteração de um parâmetro apenas pode modificar drasticamente o comportamento térmico do edifício.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido e das conclusões apresentadas nos pontos anteriores, de entre as possíveis linhas de investigação que se poderão ser desenvolvidos na sequência desta dissertação, destacam-se as de maior interesse:

- caracterizar de que forma o parâmetro "Eficiência das Aberturas" varia com geometria e área das mesmas utilizando programas de dinâmica dos fluidos computacional;
- aplicar as conclusões do presente estudo num caso prático de forma a avaliar e validar o modelo desenvolvido por Brent Griffith;
- melhorar o modelo desenvolvido por Brent Griffith de forma a ser possível a introdução de novos materiais no deflector, para estudar e perceber que consequências estes podem ter no comportamento térmico do edifício;
- estudar outros parâmetros, tais como, razão entre a área actual da superfície e a área da superfície projectada e coeficiente de descarga.
- avaliar o comportamento das fachadas ventiladas utilizando programas de dinâmica dos fluidos computacional.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Mendonça, Habitar sob uma segunda pele, Tese de Doutoramento, Guimarães, Universidade do Minho, 2005.
- [2] V. Freitas, Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior, Maxit, Porto, Dezembro de 2002.
- [3] F. Henriques, Reabilitação Térmica de Edifícios, Agosto de 2007.
- [4] Dossier Técnico - Económico Fachadas ventiladas, nº 2, Outubro de 2006.
- [5] L. Agnoletto, G. Cortella and M. Manzan, Finite element thermal analysis of special building components, *Energy and Buildings*, 22 (2) 115-123, 1995.
- [6] C. Afonso and A. Oliveira, Solar chimneys: simulation and experiment, *Energy and Buildings*, 32(1) 71-79, 2000.
- [7] C. Balocco, A simple model to study ventilated facades energy performance *Energy and Buildings*, 34(5) 469-475, 2002
- [8] N. Hamza, Double versus single skin facades in hot arid areas *Energy and Buildings*, 40(3) 240-248, 2008.
- [9] R. Høseggen, B.J. Wachenfeldt and S.O. Hanssen, Building simulation as an assisting tool in decision making: Case study: With or without a double-skin façade?, *Energy and Buildings*, 40(5) 821-827, 2008.
- [10] E. Gratia and A. De Herde, Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin?, *Energy and Buildings*, 39(5) 605-619, May 2007.
- [11] D. Saelens, S. Roels and H. Hens, Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades, *Building and Environment*, 43(4) 638-650 Part Special: Building Performance Simulation, 2008
- [12] W.J. Stec and A.H.C. van Paassen, Symbiosis of the double skin façade with the HVAC system, *Energy and Buildings*, 37(5) 461-469, May 2005.
- [13] AVEIRO DOMUS, Sub Projecto de Isolamento Térmico 2º Relatório de Progresso, Junho de 2006
- [14] T. Pasquay, Natural ventilation in high-rise buildings with double facades saving or waste of energy, *Energy and Buildings*, 36(4) 381-389, April 2004.
- [15] R. Mateus, Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção, Tese de mestrado, Braga, Universidade do Minho, Março de 2004.
- [16] C. Balocco, F. Brazzocchi, P. Nistri, Facciata Ventilata in laterizio : tecnologia e prestazioni, *Costruire in laterizio*, 83, 63-75, 2001.

- [17] R. Mendes e F. Barth, Análise do desempenho térmico de fachadas ventiladas com tijolos cerâmico segundo o projecto da norma brasileira – Desempenho térmico de edificações, V encontro nacional de conforto no ambiente construído e II encontro Latino – Americano de Conforto no Ambiente Construído, 1999.
- [18] F. Barth, The hygro-thermal performance of ventilated facade in a hot Humid climate, The 18th International Conference on Passive and low Energy Architecture, Florianopolis, 2001.
- [19] F. Barth, A. Grilo, Análise Hígro – térmica de fachadas ventiladas nas condições de inverno, IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Brasil, 2002.
- [20] M. Ciampi, F. Leccese and G. Tuoni, Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings, Solar Energy, 75(6)491-502, December 2002.
- [21] C. Balocco, A non-dimensional analysis of a ventilated double façade energy performance, Energy and Buildings, 36(1) 35-40, January 2004.
- [22] L. Aelenei, A. Rodrigues e D. Aelenei, Estudo Experimental e Numérico de uma parede com espaço de ar intermédio ventilado, Actas do congresso nacional da construção – Construção 2004: Repensar a Construção, Faculdade de Engenharia do Porto, 2004.
- [23] B. Griffith, A model for Naturally Ventilated cavities on the exteriors of opaque Building Thermal Envelopes, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Co.
- [24] A. Muller, A. Oliveira, S. Guths, O. Alarcon, Thermal Behavior of Ventilated Facades Assembled Using Porcelain – Coated Stoneware Tile, American Ceramic Society Bulletin, 86 (6)35-39, 2007.
- [25] European Directive on the energy performance of buildings, 2002/91/EC, European Parliament and Council, 2002.
- [26] E. Naboni, Ventilated Opaque Walls – A performance simulation Method and Assessment of simulated Performance, Seminar Notes presented at Lawrence Berkeley National Laboratory Environmental Energy Technologies Division Berkeley, California, 28 de Maio 2007.
- [27] DL 80/2006 – RCCTE Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios.

- [28] ASHRAE, ASHRAE Handbook-Fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 1997.
- [29] F.P. Incropera e D.P. de Witt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons ,5ª Edição, 2001